

**Werkerassistenzsysteme und die Absicherung von Montageprozessen
in der automobilen Prototypenmontage**

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

von
Stephan Rupp

**Saarbrücken
2024**

Tag des Kolloquiums: 09.10.2024

Dekan: n.n.

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller
Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber

Akad. Mitglied: Dr.-Ing. Christian Bur

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre

Kurzfassung

In der Automobilbranche stellt die Fähigkeit neue Produkte schnell auf den Markt bringen zu können einen wesentlichen Erfolgsfaktor dar. Um die *time-to-market* zu reduzieren und Profitabilität sowie Flexibilität zu steigern, müssen Entwicklungsprozesse beschleunigt und Kosten gesenkt werden. Trotz virtueller Absicherungsmethoden sind physische Prototypen für die Serienentwicklung heute noch unverzichtbar und werden dies auch auf absehbare Zeit bleiben. Diese Arbeit erforscht daher, wie die Prototypenmontage mit einem Montageassistenzsystem optimiert und gleichzeitig ihr Nutzen für die Serienentwicklung gesteigert werden kann.

Im Rahmen einer Studie zur industriellen Praxis konnten die Absicherung von Produktkonzepten und Montageabläufen sowie die Dokumentation und Kommunikation von Defiziten als verbesserungswürdig identifiziert werden. Daher wurde eine Methode konzipiert und ausgearbeitet, die eine iterative Entwicklung von Produkt und Montagesystem in schnellen Optimierungszyklen mithilfe eines Assistenzsystems anstrebt, welches Informationsflüsse und Kommunikation unterstützt.

Um den Ansatz evaluieren zu können, wurde eine entsprechende technische Lösung entwickelt. Durch eine zweite Studie wurde die Anwendbarkeit von Methode und System demonstriert und gezeigt, dass sich positive Auswirkungen auf diverse Aspekte der Montage erzielen lassen, insbesondere die operative Effizienz. Gleichzeitig trägt die Methode zur Steigerung der Reife und Qualität des Produkts bei, da Optimierungspotenziale konsequent und frühzeitig identifiziert und Lösungsfindungsprozesse unterstützt werden. Durch die systematische Anwendung, Prüfung und Optimierung der geplanten Serienmontageprozesse, trägt die Methode auch zu einer höheren Qualität des resultierenden Montagesystems bei.

Abstract

In the automotive industry, introducing new innovative products faster than competitors forms a key success factor for OEMs. To reduce time-to-market and increase profitability as well as flexibility, it is critical to speed up the development process while at the same time reducing the cost. Despite the increasing use of virtual, hardware prototypes are indispensable today and will remain necessary in the foreseeable future. Therefore, this work explores, how an assistance system can be applied to optimize the prototype assembly while at the same time maximizing the benefit for the series development.

A case-study regarding current industrial practice revealed, that the systematic evaluation of product concepts and assembly processes as well as the documentation and communication of issues are often suboptimal. Thus, a method for the iterative development of product and assembly system through fast improvement cycles, supported by an assistance system that provides efficient information flows and communication, was developed.

To evaluate the approach, a corresponding technical system was developed. A second study demonstrated the applicability of the method and the system and indicated positive impact in several ways, especially operational efficiency. At the same time, the method contributes to the maturity and quality of the product by fostering the identification of conceptual problems and potential for improvement early on and supporting a fast resolution. By systematically applying, evaluating and optimizing the processes planned for the series, the method also helps to improve the quality of the resulting assembly system.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand im Prototypenwerk der BMW Group in Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA) Saarbrücken. An dieser Stelle möchte ich mich bei den Personen bedanken, die mich bei meinem Promotionsprojekt unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Rainer Müller für die Einführung in das Themengebiet der Automobilmontage durch zahlreiche Veranstaltungen am ZeMA, viele anregende Gespräche und Diskussion über das Forschungsprojekt und im Allgemeinen die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit. Prof. Dr. Michael Vielhaber möchte ich dafür danken, dass er für meine Arbeit als wissenschaftlicher Begleiter und Zweitgutachter zur Verfügung stand. Den (ehemaligen) Mitarbeitern des ZeMA, insbesondere Dr. Leenhard Hörauf, Dr. Attique Bashir und Jessica Hinkel danke ich für den Austausch, die Beratung und Unterstützung sowie die angenehme Zusammenarbeit bei diversen gemeinsamen Veranstaltungen und Projekten.

Dr. Alexander Susanek, dem Leiter des Prototypenwerks der BMW Group und Markus Vogt, dem Leiter der Prototypenmontage möchte ich dafür danken, dass sie dieses Forschungsprojekt initiiert, ermöglicht und mit Rat und Ressourcen unterstützt haben. Auch meinen Kollegen in der Prototypenmontage, insbesondere Bastian Kolbinger und Gerhard Zitzelsberger danke ich für die gute und intensive Zusammenarbeit, viele inspirierende Gespräche und lehrreiche Erfahrungen. Weiterhin danke ich allen Kollegen und Freunden, die mir mit Ratschlägen, Zuspruch und Korrekturen zur Seite standen.

Meinen Eltern danke ich dafür, dass sie mir die akademische Laufbahn ermöglicht und mich stets unterstützt haben. Letztlich danke ich meiner Partnerin Janina für ihre Geduld und die Motivation, ohne die diese Arbeit wahrscheinlich nie vollendet worden wäre.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-------------|
| Inhaltsverzeichnis | I |
| Abbildungsverzeichnis | V |
| Tabellenverzeichnis | IX |
| Abkürzungsverzeichnis | XI |
| Glossar | XVII |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Motivation | 1 |
| 1.2 Zielsetzung | 4 |
| 1.3 Forschungskonzeption | 5 |
| 1.4 Aufbau der Arbeit | 11 |
| 2 Automobilmontage in Serie und Serienentwicklung | 13 |
| 2.1 Die Fahrzeugmontage in der Serienproduktion | 14 |
| 2.1.1 Einordnung in den Produktionsablauf | 14 |
| 2.1.2 Struktur der Fahrzeugendmontage | 17 |
| 2.1.3 Arbeitsorganisation | 18 |
| 2.1.4 Montagefunktionen | 19 |
| 2.1.5 Betriebsmittel | 22 |
| 2.1.6 Qualifizierung, Information und Fehler in der Montage | 23 |
| 2.2 Montageplanung und Prototypenproduktion in der Serienentwicklung | 25 |
| 2.2.1 Montageplanung und Arbeitsvorbereitung | 26 |
| 2.2.2 Serienproduktionsanlauf | 28 |
| 2.2.3 Prototypenmontage in der Serienentwicklung | 29 |
| 2.2.4 Absicherung von Montageprozessen | 31 |
| 2.3 Digitalisierung in der Montage – „Industrie 4.0“ | 33 |
| 3 Praxisdefizit, Stand der Wissenschaft und Forschungsbedarf | 35 |
| 3.1 Herausforderungen und Potenziale bei der Prozessabsicherung in der industriellen Praxis | 35 |
| 3.1.1 Erkenntnisse und Hypothesen aus der Literatur | 35 |
| 3.1.2 Fallstudie in der Cockpitvormontage | 38 |
| 3.1.2.1 Anlauf und Serie | 38 |
| 3.1.2.2 Prototypenbau | 42 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.1.2.3 | Montageprozessabsicherung außerhalb der Prototypen- und Vorserienproduktion | 49 |
| 3.1.3 | Diskussion und Bewertung | 51 |
| 3.2 | Strukturierte Literaturrecherche zum Stand der Wissenschaft..... | 53 |
| 3.2.1 | Methodik und Durchführung | 53 |
| 3.2.2 | Diskussion der Ergebnisse | 56 |
| 3.2.2.1 | Absicherung und Optimierung von Montageprozessen, Messung ihrer Reife und Wissenstransfer in die Serie | 56 |
| 3.2.2.2 | Informations- und Assistenzsysteme für die manuelle Montage | 64 |
| 3.2.3 | Zusammenfassung | 77 |
| 3.3 | Zwischenfazit und Forschungsfragen..... | 79 |
| 4 | Konzeption einer Methode zur Absicherung von Serienmontageprozessen im Prototypenbau | 81 |
| 4.1 | Gestaltungsmöglichkeiten bei der Absicherung und Messung des Reifegrades in der Serienentwicklung | 81 |
| 4.2 | Abzusichernde Aspekte und Eigenschaften | 90 |
| 4.2.1 | Sammlung und Kategorisierung | 90 |
| 4.2.2 | Betrachtung im Montageablauf | 95 |
| 4.2.3 | Zusammenfassung und Fazit..... | 101 |
| 4.3 | Anwendungsmöglichkeiten für Assistenzsysteme..... | 103 |
| 4.4 | Lösungshypothesen und Erfolgskriterien..... | 106 |
| 4.5 | Grobkonzept | 111 |
| 5 | Ausarbeitung der Methode..... | 114 |
| 5.1 | Modellierung | 114 |
| 5.1.1 | Produkt | 115 |
| 5.1.2 | Montagestruktur..... | 118 |
| 5.1.3 | Montageprozesse | 119 |
| 5.1.4 | Montagesituation | 122 |
| 5.1.5 | Problemmanagement | 127 |
| 5.1.6 | Absicherung und Reifegradbewertung..... | 130 |
| 5.2 | Entwurf eines Assistenzsystems zur Anwendung der geplanten Serienprozesse in der Prototypenmontage | 134 |
| 5.2.1 | Planungsmethodik und Datenmodell | 135 |
| 5.2.2 | Schnittstellen zur Arbeitsvorbereitung und Logistik | 141 |
| 5.2.3 | Darstellung der Arbeitsanweisungen im Montageablauf, Prozessüberwachung und Dokumentation | 145 |

| | | |
|--------------------|---|------------|
| 5.3 | Umgang mit unvollständigen bzw. fehlerhaften Daten und Problemmanagement | 147 |
| 5.3.1 | Grundlegende Fehlerarten und Defizite in den Produkt- und Prozessdaten | 147 |
| 5.3.2 | Mitigationsmechanismen, automatische Korrektur bzw. Ergänzung der Produkt- und Prozessdaten und Abweichungen vom Serienprozess | 150 |
| 5.3.3 | Softwaregeführte Problemklassifizierung und -meldung | 152 |
| 5.4 | Gezielte Absicherung und Reifegradbestimmung | 154 |
| 5.4.1 | Produktionsbegleitende Prozessbewertung mit einem Montageassistenzsystem | 155 |
| 5.4.2 | Bestimmung und Darstellung des Absicherungsstands | 160 |
| 6 | Realisierung eines Assistenzsystems für die Prototypenmontage | 164 |
| 6.1 | Zielsetzung und Anforderungen | 164 |
| 6.2 | Technische Konzeption | 166 |
| 6.2.1 | Rahmenbedingungen und Vorgehensweise | 167 |
| 6.2.2 | Entwurfsmuster und Systemarchitektur | 167 |
| 6.2.3 | Arbeitsablauf und Applikationslogik | 171 |
| 6.2.4 | Fachliches Datenmodell | 177 |
| 6.3 | Implementierung und Entwicklungsergebnis | 178 |
| 7 | Evaluation am Beispiel der Cockpit-Vormontage..... | 184 |
| 7.1 | Zielsetzung der Fallstudie | 184 |
| 7.2 | Betrachtungsbereich, Ausgangssituation und Rahmenbedingungen | 185 |
| 7.3 | Vorgehensweise und Bewertungskriterien | 186 |
| 7.4 | Ergebnisse und Diskussion | 187 |
| 7.5 | Fazit | 192 |
| 8 | Diskussion und Ausblick | 194 |
| 9 | Literaturverzeichnis..... | 202 |
| Anhang..... | | 216 |
| A. | Mitarbeiterbefragung Prototypenmontage | 216 |
| B. | Ergebnisse der Literaturrecherche | 236 |
| C. | Protokoll der Fallstudie | 249 |
| D. | Zugehörige studentische Arbeiten | 250 |
| E. | Veröffentlichungen | 251 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------------------|--|-----|
| Abbildung 1: | Qualitativer Verlauf der Änderungsmöglichkeiten und -kosten über die Phasen des Produktentwicklungsprozesses | 4 |
| Abbildung 2: | Zweidimensionales DSR-Framework | 6 |
| Abbildung 3: | Framework für die Forschung an Informationssystemen | 8 |
| Abbildung 4: | Vorgehensmodell für die designorientierte Forschung | 11 |
| Abbildung 5: | Aufbau der Arbeit und Einordnung in die Forschungsmethodik | 12 |
| Abbildung 6: | Kernprozesse der Automobilindustrie | 13 |
| Abbildung 7: | Schematische Darstellung der Gewerke und der Struktur in der Automobilproduktion | 15 |
| Abbildung 8: | Vergleich der Gewerke der Automobilproduktion hinsichtlich Automatisierungsgrad, Kapitaleinsatz und Variantenvielfalt..... | 16 |
| Abbildung 9: | Struktur und Bereiche der Fahrzeugmontage in einem Serienwerk..... | 18 |
| Abbildung 10: | Primäre und sekundäre Montagefunktionen | 19 |
| Abbildung 11: | Zeitbewertung in der Automobilmontage..... | 21 |
| Abbildung 12: | Entwicklung der Arbeitsleistung während der Lernzeit | 23 |
| Abbildung 13: | Lerneffekte bei verschiedenen sensumotorischen Tätigkeiten..... | 24 |
| Abbildung 14: | Phasen und Kernaufgaben der Montageplanung | 27 |
| Abbildung 15: | Phasen des Serienanlaufs und Entwicklung der Stückzahlen..... | 29 |
| Abbildung 16: | Beispiel eines Standardarbeitsblatts | 39 |
| Abbildung 17: | Schematische Darstellung der Cockpitmontagelinie..... | 40 |
| Abbildung 18: | Endzone der Cockpitmontagelinie im BMW Werk München | 40 |
| Abbildung 19: | Anzeige des Varianteninformationssystems | 41 |
| Abbildung 20: | Struktur einer Linie in der Prototypenmontage bei der BMW Group | 44 |
| Abbildung 21: | Absicherungsworkshops im Produktentwicklungsprozess | 49 |
| Abbildung 22: | Methodik der Literaturrecherche..... | 53 |
| Abbildung 23: | Cluster im Themenbereich <i>Evaluation und Absicherung</i> | 56 |
| Abbildung 24: | Frühzeitige Entdeckung von Defiziten als Maß für die Steigerung des Reifegrads | 59 |
| Abbildung 25: | Cluster im Themenbereich Informations- und Assistenzsysteme..... | 64 |
| Abbildung 26: | Systemarchitektur für Montageassistenzsysteme..... | 76 |
| Abbildung 27: | Schematische Darstellung der Entwicklungsphasen, Absicherungsformen und des Reifegrades | 83 |
| Abbildung 28: | Klassifizierung von Absicherungsmaßnahmen anhand von Betrachtungsumfang (horizontale Testabdeckung) und -tiefe (vertikale Testabdeckung) | 87 |
| Abbildung 29: | Modell eines Arbeitsschritts in der manuellen Montage..... | 96 |
| Abbildung 30: | Angestrebter Verlauf von Reifegrad und Problemmeldungen | 109 |
| Abbildung 31: | Die drei Kernbestandteile der vorgeschlagenen Methode | 112 |
| Abbildung 32: | Modell diskreter Reifegradstufen..... | 113 |
| Abbildung 33: | Die drei Modell-Domänen und ihre wesentlichen Inhalte | 115 |

| | | |
|----------------------|--|-----|
| Abbildung 34: | Beispiel für die hierarchische Strukturierung des Produkts | 115 |
| Abbildung 35: | Positionen der Baugruppe Lenksäule im 3D Modell des 7er BMW | 116 |
| Abbildung 36: | Positionen, Positionsvarianten und Materialstammdaten | 117 |
| Abbildung 37: | Auflösung der Produktstruktur zur auftragspezifischen Stückliste | 118 |
| Abbildung 38: | Hierarchische Gliederung der Fahrzeugmontage | 119 |
| Abbildung 39: | Strukturierung des Montageprozesses in Montageschritte, Tätigkeiten und Arbeitspakete am Beispiel der Lenksäule in der Cockpitvormontage | 120 |
| Abbildung 40: | Modell für die Spezifikation von Montageschritten bei der Planung | 121 |
| Abbildung 41: | Modell einer manuellen Montagesituation | 123 |
| Abbildung 42: | Modellierung eines Montageprozesses als Zustandsänderung des Montageobjekts | 125 |
| Abbildung 43: | Mögliche Ergebnisse eines Montageschritts | 127 |
| Abbildung 44: | Modell des Problemmanagement-Prozesses (PMP) | 128 |
| Abbildung 45: | Vereinfachtes Datenmodell für die Bewertung von Montageschritten | 131 |
| Abbildung 46: | Logische Verknüpfung von Produktstruktur und Montageprozess mittels Produkt- Prozess-Kopplung am Beispiel der Lenksäule | 136 |
| Abbildung 47: | Produkt-Prozess-Beziehungen am Beispiel des Kabelbaums im Cockpit | 137 |
| Abbildung 48: | Die Verschraubung der Cockpitabdeckung als Beispiel für die Aufteilung einer Position auf mehrere Montageschritte | 138 |
| Abbildung 49: | Die Kopplung von Prozess- und Produktdaten eröffnet die Möglichkeit auftrags- und arbeitsplatzbezogene Prozess und Materiallisten abzuleiten | 139 |
| Abbildung 50: | Die Verknüpfung der Ressourcenplanung mit den Montagprozessen ermöglicht die Ableitung des auftrags- und arbeitsplatzbezogenen Ressourcenbedarfs | 140 |
| Abbildung 51: | Zuordnung der Serienmontagebereiche auf die fünf Zonen (blau) und vier Vormontagen einer Linie des Prototypenwerks | 141 |
| Abbildung 52: | Modellierung der Datenflüsse im Kontext der Prototypenmontage | 144 |
| Abbildung 53: | Die wichtigsten potenziellen Fehler in Produktkonzept und Produktstrukturdaten, Montageprozessen und den Produkt-Prozess- Beziehungen | 148 |
| Abbildung 54: | Visualisierung des Absicherungsstands nach dem vereinfachten Modell | 161 |
| Abbildung 55: | Erweiterte Visualisierung des Absicherungsstands | 162 |
| Abbildung 56: | Generische Architektur des Montageassistenzsystems | 171 |
| Abbildung 57: | Übersicht über den grundlegenden Arbeitsablauf | 171 |
| Abbildung 58: | Detaillierte Darstellung des Arbeitsablaufs bei der Montage | 173 |
| Abbildung 59: | Übersicht über die wesentlichen Elemente des Assistenzsystems | 176 |
| Abbildung 60: | Fachliches Datenmodell des Montageassistenzsystems | 177 |
| Abbildung 61: | Visualisierung von Bauteilen auf Basis von 3D Modellen im Assistenzsystem | 179 |

| | | |
|----------------------|---|-----|
| Abbildung 62: | Die Ansicht "Aufnehmen" bei einem Arbeitsschritt mit mehreren Komponenten..... | 180 |
| Abbildung 63: | Die Ansicht "Montieren" bei einem einfachen Arbeitsschritt ohne Schraubverbindung..... | 180 |
| Abbildung 64: | Schraubstellenerkennung und Darstellung der Verschraubung im Assistenzsystem | 181 |
| Abbildung 65: | Schematische Darstellung des Versuchsarbeitsplatzes in der Cockpitvormontage | 182 |
| Abbildung 66: | Physischer Aufbau des Versuchsarbeitsplatzes | 183 |
| Abbildung 67: | Auswertung der Durchlaufzeiten und der Zeitanteile in den beiden Versuchsgruppen | 188 |
| Abbildung 68: | Durchschnittlicher Zeitaufwand nach Tätigkeitskategorie je Fahrzeug | 189 |
| Abbildung 69: | Wesentliche Problemklassen und die durch sie hervorgerufenen Verzögerungen..... | 190 |
| Abbildung 70: | Im Rahmen der Fallstudie entdeckte konzeptionelle Defizite in Produkt und Prozess nach Fehlerart..... | 191 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|--------------------|--|-----|
| Tabelle 1: | Trends und Herausforderungen in der Automobilindustrie und ihre Auswirkungen auf Produkt und Produktion | 2 |
| Tabelle 2: | Evaluationsmethoden in der DSR | 9 |
| Tabelle 3: | Richtlinien für DSR..... | 10 |
| Tabelle 4: | Die Gewerke der Automobilproduktion und ihre Aufgaben..... | 16 |
| Tabelle 5: | Analyse der Zeitanteile primärer und sekundärer Montagetätigkeiten in der Montage der BMW 3er Limousine (F30)..... | 20 |
| Tabelle 6: | Beispiele für kommerziell verfügbare Werkerassistenzsysteme..... | 34 |
| Tabelle 7: | Für Recherche in dieser Arbeit genutzte Literaturdatenbanken | 54 |
| Tabelle 8: | Begriffe des ersten Themenbereichs | 55 |
| Tabelle 9: | Begriffe des zweiten Themenbereichs | 55 |
| Tabelle 10: | Die Eignung von Informationsträgern für Inhalte und Darstellungsformen..... | 73 |
| Tabelle 11: | Für den Produktionsanlauf abzusichernde Kriterien | 91 |
| Tabelle 12: | Auszug aus dem Fragenkatalog für die gezielte Absicherung von Montageprozessen | 158 |
| Tabelle 13: | Faktoren zur Ermittlung der Konfidenz einer Einzelbewertung..... | 159 |

Abkürzungsverzeichnis

| | | |
|-----------------|-------------------------------------|--|
| AR | Augmented Reality | Computergestützte Erweiterung der Realitätswahrnehmung, beispielweise indem mittels <i>Smart Glasses</i> Informationen ins Sichtfeld des Trägers projiziert werden |
| BLE | Bluetooth Low Energy | Drahtloser Kommunikationsstandard, der auf geringen Energieverbrauch und die Anwendung in mobilen Endgeräten ausgerichtet ist |
| BOM | Bill of Materials | Englische Bezeichnung für die Stückliste eines Produkts oder einer Baugruppe |
| (3D-)CAD | Computer Aided Design | Software für die (dreidimensionale) Modellierung, Analyse und Darstellung von Produkten / Konstruktionen |
| CPS | Cyber-physische Systeme | Systeme, die sowohl informations- und softwaretechnische wie auch mechanische Komponenten bzw. Aktorik umfassen und damit softwaregesteuert einen Einfluss auf die physische Welt ausüben können |
| DDD | Domain-driven Design | Vorgehensweise für den Systementwurf, bei dem fachliche Zusammenhänge im Vordergrund stehen |
| DIN | Deutsches Institut für Normung e.V. | Nationale Normungsorganisation in Deutschland mit Sitz in Berlin |
| DPWS | Devices Profile for Web Services | Software-Standard, der darauf abzielt Web Services sicher und effizient auf Hardware mit beschränkten Ressourcen (<i>embedded Systems</i>) bereitzustellen |
| DSR | Design Science Research | Eine Forschungsmethodik aus dem Bereich der Wirtschaftsinformatik |
| EEG | Elektroenzephalographie | Methode aus der medizinischen Diagnostik bzw. der neurologischen Forschung zur Messung der elektrischen Aktivität des Gehirns mittels Elektroden an der Kopfoberfläche; kann auch zur Messung der kognitiven Aktivität / Belastung eingesetzt werden |
| eHPV | Engineering Hours per Vehicle | Konstruktiv bedingter Arbeitsinhalt eines Fahrzeugs |

| | | |
|---------------|---------------------------------|--|
| EN | Europäische Normen | Normen, die durch einen öffentlichen Normungsprozess entstanden und von einem der drei europäischen Komitees für Normung (Europäisches Komitee für Normung CEN, Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung CENELEC, Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen ETSI) ratifiziert worden sind |
| EoP | End of Production | Zeitliches Ende der Serienproduktion eines Fahrzeugmodells |
| EoL | End of Line | Bereich am Ende der Montage, in dem das Fahrzeug befüllt, in Betrieb genommen, geprüft und für den Transport vorbereitet wird |
| ERD | Entity Relationship Diagram | Grafische Darstellung von Entitäts- und Beziehungstypen in einem netzartigen Diagramm, wobei diverse anwendungsspezifische Notationen existieren |
| ERP | Enterprise Ressource Planning | Bezeichnet allgemein die Aufgabe Personal, Ressourcen, Kapital, Betriebsmittel, Material und Informationsflüsse im Sinne des Unternehmenszwecks rechtzeitig und bedarfsgerecht zu planen; meist wird damit eine Software-Lösung bezeichnet, die diesem Zweck dient (ERP-System). |
| ESD | Electrostatic discharge | Elektrostatische Entladung durch Potentialdifferenz; kann elektronische Bauteile beschädigen oder brennbare Stoffe entzünden |
| ETL | Extract Transform Load | Prozess, bei dem Daten aus mehreren, ggf. unterschiedlich strukturierten Datenquellen in eine Zieldatenstruktur kombiniert werden |
| HPV | Hours per Vehicle | Gesamter direkter und indirekter Arbeitsaufwand für die Fahrzeugmontage |
| HUD | Head-up-Display | Anzeigesystem, das Informationen auf eine Scheibe im Sichtfeld des Nutzers projiziert (vgl. <i>augmented Reality</i>) |
| (I)IoT | (industrial) Internet of Things | (Industrielles) Internet der Dinge; Sammelbegriff für Technologien, die dazu dienen Maschinen und Systeme informationstechnisch miteinander zu vernetzen |

| | | |
|-------------------|--|---|
| IPC | Industrial PC | Spezialisierter Computer für den Einsatz im Industrieumfeld |
| ISO | International Organization for Standardization | Internationale Vereinigung von Normungsorganisationen mit Sitz in der Schweiz |
| JSON | JavaScript object notation | Textbasiertes Datenformat für den Datenaustausch zwischen Anwendungen |
| JIS | Just in Sequence | Reihenfolgesynchronität; erweitert das Logistikkonzept „Just in Time“, indem die Bereitstellung nicht sortenreiner Komponenten bereits in der Sequenz erfolgt, in der diese verbaut werden |
| JIT | Just in Time | Bedarfssynchrone Materialbereitstellung; Logistikkonzept für die bestandslose Materialanlieferung, bei dem die Bereitstellung „gerade zur rechten Zeit“ erfolgt, also wenn das Material in der Produktion benötigt wird |
| JT | Jupiter Tessellation | ISO-Standard-Grafikformat für 3D-Daten und CAD-Geometrien basierend auf Dreiecksflächen (Tessellierung: Zerlegung der Oberflächen von räumlichen Objekten in Dreiecke) |
| KVP | Kontinuierlicher Verbesserungsprozess | Philosophie, die durch stetige Verbesserungen in kleinen Schritten die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens stärken soll; Grundprinzip des Qualitätsmanagements (vgl. ISO9001); stammt aus dem japanischen <i>Kaizen</i> (dt. „Veränderung / Wandel zum Besseren“) bzw. dem Toyota-Produktionssystem |
| (RGB-) LED | Light-emitting Diode | (kombinierte, rote, grüne und blaue) Leuchtdiode |
| M2M | Machine-to-Machine Kommunikation | Automatisierter Informationsaustausch zwischen Systemen (Maschinen, Automaten, Fahrzeugen, etc.) untereinander oder mit einer zentralen Stelle |
| MES | Manufacturing Execution System | IT-System, das die Produktion steuert (Produktionsleitsystem); bildet im Modell der Automatisierungspyramide die Betriebsleitebene; verortet unterhalb des ERP-Systems (Unternehmensebene) aber oberhalb der Prozessleitebene (SCADA), der Steuerungs- sowie der Feldebene |

| | | |
|----------------|---|--|
| MMAL | Mixed-model assembly line | Montagelinie, auf der mehrere unterschiedliche Modelle montiert werden (vgl. Modellmix) |
| MQTT | Message Queuing Telemetry Transport | Offenes, event-basiertes Kommunikationsprotokoll, das für die Übertragung von Telemetriedaten im Rahmen der Machine-to-Machine-Kommunikation entwickelt wurde |
| MRK | Mensch-Roboter-Kollaboration | Bezeichnet Steuerungs- und Sicherheits-Technologien aus dem Bereich der Robotik, die es ermöglichen, dass Mensch und Roboter gleichzeitig in einen Arbeitsraum ohne trennende Schutzzäune zusammenarbeiten |
| MTM | Methods-Time-Measurement | Planungsmethode zur Bestimmung der Zeitdauer von Montagetätigkeiten auf Basis von Tabellen, die vorbestimmte Zeitwerte für Grundbewegungen enthalten |
| OEM | Original equipment manufacturer | Erstausrüster, in der Automobilindustrie synonym zu Fahrzeughersteller verwendet |
| OPC-UA | Open Platform Communications - Unified Architecture | Standard für den plattformunabhängigen Datenaustausch im Kontext einer service-orientierten Architektur im industriellen Umfeld |
| PDM | Produktdatenmanagement | IT-System, in dem produktdefinierende, repräsentierende und präsentierende Daten (Ergebnisse der Produktentwicklung) gespeichert / verwaltet werden |
| PEP | Produktentwicklungsprozess | Geschäftsprozess, der die Abläufe von der Idee für ein neues Produkt bis zur Produktion dieses Produkts umfasst |
| PLC | programmable logic controller | Siehe SPS (speicherprogrammierbare Steuerung) |
| PPK | Produkt-Prozess-Kopplung | Logische Verknüpfung von Bauteilen und Montageprozessen (vgl. Kapitel 5.2.1) |
| PSA | Persönliche Schutzausrüstung | Bezeichnet im Arbeitsschutz Ausrüstung zum Selbstschutz, deren Anwendung bei potenziell gesundheitsgefährdenden Tätigkeiten gesetzlich gefordert ist z.B. Schutzbrille, Handschuhe, Arbeitsschuhe |
| QR-Code | Quick Response Code | Zweidimensionaler optischer Code mit Mechanismen für die Fehlerkorrektur (vgl. <i>DataMatrix-Code</i>) |

| | | |
|---------------|-------------------------------------|---|
| SBM | Sonderbetriebsmittel | Spezialwerkzeuge, Vorrichtungen, kleinere Anlagen |
| RFID | Radio Frequency Identification | Auf Radiowellen basierende Technologie zur Identifikation oder Lokalisation bzw. maschineller Übermittlung geringer Datenmengen |
| RS-232 | Recommended Standard 232 | Standard für serielle Schnittstellen |
| SoP | Start of Production | Start der Serienproduktion eines Fahrzeugmodells |
| SPA | Single-page Application | Webanwendung, die nur eine Webseite nutzt und den Inhalt dynamisch anpasst ohne die Seite neu zu laden |
| SPS | Speicherprogrammierbare Steuerung | Gerät, das im industriellen Umfeld zur Steuerung oder Regelung eingesetzt und digital programmiert wird; die Abarbeitung des Programms erfolgt zyklisch mit einer definierten Zykluszeit, typischerweise im Bereich einiger Millisekunden |
| USB | Universal Serial Bus | Serielle Datenübertragungsschnittstelle |
| UWB | Ultra Wide Band | Ultrabreitband beschreibt Technologien für die Nahbereichsfunkkommunikation, die zur Datenübertragung oder Lokalisation eingesetzt werden können |
| VDA | Verband der Automobilindustrie e.V. | Spitzenverband der deutschen Automobilhersteller und -zulieferer mit Sitz in Berlin |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure e.V. | Technisch-wissenschaftlicher, gemeinnütziger Verein mit Sitz in Düsseldorf |
| VK | Variantenkombination | Kombination der Bauteilvarianten, die bei einer bestimmten Fahrzeugkonfiguration verbaut werden (vgl. Kapitel 5.1.6) |
| VPS | Verbindungsparametersatz | Parameter für einen Verbindungsprozess, bei einer Verschraubung z.B. Drehmoment und Drehzahl |
| VR | Virtual Reality | Virtuelle Realität bezeichnet im Unterschied zur <i>Augmented Reality</i> die Darstellung einer vollständig künstlich generierten Wirklichkeit |
| WAS | Werkerassistenzsystem | IT-System, das Werker bei ihren Tätigkeiten unterstützt (im Kontext der Montage auch Montageassistenzsystem) |

Glossar

| | |
|----------------------------------|---|
| Absicherung | Oberbegriff für alle Tätigkeiten, die im Rahmen der Produktentwicklung durchgeführt werden, um die Erreichung der Entwicklungsziele zu prüfen und den Reifegrad des Entwicklungsstands zu messen |
| Aktor | Baugruppe, die elektrische Signale in mechanische Bewegung umsetzt (z.B. Motor) oder physikalischer Größen (z.B. Druck, Temperatur) verändern um einen Prozess zu steuern oder zu regeln; wird auch als Aktuator bezeichnet |
| Backend (Software) | Technische Komponenten einer Software, die im Hintergrund wesentliche Funktionen bereitstellen, dem Nutzer jedoch in der Regel verborgen bleiben; der Anwender interagiert über die Benutzeroberfläche (Frontend) mit dem Backend; bei der Client-Server-Architektur bilden die serverseitigen Module i.d.R. das Backend, während die client-seitigen Elemente das Frontend darstellen |
| Barcode | Strichcode; optoelektronische Schrift, die aus verschiedenen breiten, parallelen Strichen und Lücken besteht, mit optischen Lesegeräten gelesen und elektronisch verarbeitet werden kann |
| Betriebsmittel | Betriebsmittel stellen die technischen Voraussetzungen der betrieblichen Produktion dar und gehören zu den elementaren Produktionsfaktoren, die für die betriebliche Leistungserstellung benötigt werden (nach der, in der Betriebswirtschaftslehre verbreiteten Klassifizierung der Produktionsfaktoren von Erich Gutenberg); sie lassen sich in materielle (z.B. Gebäude, Maschinen, Werkzeuge, Bauteile) und immaterielle Betriebsmittel unterteilen (z.B. Patente, Information, Wissen) |
| Brown Field | Bezeichnet im Kontext der Automobilindustrie ein Bestandswerk, das umgebaut oder angepasst wird |
| Chassis | Teil der Hauptmontage, umfasst die Hochzeit und den Ausbau des Motorraums |
| Client-Server-Architektur | IT-Architektur, bei der ein oder wenige zentrale Server Dienste bereitstellen, die von vielen Clients genutzt werden, um ihre Anwendung (i.d.R. die Bereitstellung der Benutzeroberfläche / des <i>Frontends</i>) zu realisieren, wobei die Kommunikation unter Verwendung definierter Protokolle über ein |

| | |
|--------------------------------|--|
| | Netzwerk erfolgt (meist initiiert durch einen <i>Request</i> (Anfrage) des Clients an den Server, der daraufhin eine <i>Response</i> (Antwort) liefert); je nach Umfang der Funktionalität, die auf den Clients ausgeführt wird, werden diese auch als <i>thin-</i> oder <i>thick-clients</i> bezeichnet |
| Computer Vision | Verfahren für das maschinelle Sehen mit Kameras bzw. optischer Sensorik, wird z.B. in der Qualitätskontrolle eingesetzt |
| DataMatrix-Code | Zweidimensionaler optischer Code, vergleichbar mit Bar- oder QR-Codes; wird beispielsweise zur Markierung und eindeutigen Zuordnung / Nachverfolgung von Baugruppen in der Produktion eingesetzt |
| Durchlaufzeit | Zeitspanne, die ein Arbeitsobjekt oder eine Entität zum Durchlaufen eines Systems benötigt; im Kontext der Automobilmontage die Dauer vom Beginn der Montage (dem einschleusen der lackierten Karosserie) bis zum Abschluss der Montage am <i>End of Line</i> |
| Embedded Systems | Spezialisierte Computer, die in einen technischen Kontext eingebunden (eingebettet) sind und typischerweise Überwachungs-, Steuerungs- oder Regelfunktionen ausführen |
| ePaper | „elektronisches Papier“; Display-Technologie, die sich durch geringen Energiebedarf auszeichnet und daher beispielsweise für die Behälterbeschriftung in der Logistik verwendet wird |
| Eventorientierung | Programmierparadigma zur Steuerung des Programmflusses, bei dem das Programm nicht linear / zyklisch durchlaufen wird, sondern Ereignisbehandlungsroutinen (<i>Event Handler</i>) ausgeführt werden, wenn ein Ereignis (<i>Event</i>) auftritt |
| Fehlhandlungssicherheit | Konstruktive oder organisatorische Maßnahmen zur Vermeidung menschlicher Fehler bei der Montage, beispielsweise codierte Stecker, die eine falsche Verbindung mechanisch verhindern |
| Final | Letzter Teil der Fahrzeugendmontage, umfasst Befüllung, Inbetriebnahme und diverse Prüfstände sowie Qualitätskontrollen und Justagen; auch <i>End of Line</i> |
| Framework (Software) | Programmiergerüst, das (insbesondere bei der objektorientierten) Softwareentwicklung und bei komponentenbasierten |

| | |
|----------------------------------|---|
| | Entwicklungsansätzen verwendet wird; ein Framework stellt selbst noch kein eigenständiges, funktionsfähiges Programm dar, erleichtert und beschleunigt jedoch durch Bereitstellung abstrahierter Funktionen und Module die Programmierung und stellt einheitliche Strukturen zur Verfügung |
| Frontend (Fahrzeug) | Vorderer Teil eines Fahrzeugs mit der Front-Verkleidung, bzw. der Stoßstange, dem Kühlergrill und den Scheinwerfern sowie diverser Sensorik und Elektronik; wird meist abseits der Hauptmontagelinie vormontiert und dann als Baugruppe an diese angeliefert, um dort an das weitgehend montierte Fahrzeug angebaut zu werden |
| Frontend (Software) | Benutzeroberfläche, über die ein Anwender mit einer Software interagiert (vgl. <i>Backend</i> und <i>Client-Server-Architektur</i>) |
| Gamification | Bezeichnet die Anwendung spieltypischer Elemente in einem spielfremden Kontext wie der Produktion; soll dazu beitragen Monotonie im Arbeitsalltag zu reduzieren und die Motivation bzw. Produktivität der Mitarbeiter zu steigern |
| (Geometrische) Baubarkeit | Ist gegeben, wenn Ein- und Ausbaupfade sowie eine Montagerihenfolge existieren, die es ermöglichen die Komponenten kollisionsfrei in die Konstruktionslage zu bringen (vgl. Kapitel 4.2.1) |
| Geometrische Konsistenz | Ist gegeben, wenn die Konstruktion in Konstruktionslage kollisionsfrei ist (vgl. Kapitel 4.2.1) |
| Green Field | Bezeichnet im Kontext der Automobilindustrie ein neu auf der „grünen Wiese“ geplantes und gebautes Werk |
| Hochzeit | Im Kontext der Fahrzeugmontage wird die Verbindung der vormontierten Antriebseinheit bzw. des Fahrwerks mit der Karosserie als Hochzeit bezeichnet |
| (ECE-) Homologation | Überstaatliches (nicht auf Europa beschränktes) System für die (Typ-) Zulassung von Kraftfahrzeugen und Fahrzeugteilen (ECE = Economic Commission for Europe) |
| Industrie 4.0 | Bezeichnet in Anlehnung an die drei historischen industriellen Revolutionen (Mechanisierung, Massenfertigung und Digitalisierung) Technologien und Projekte, denen das Potenzial zugeschrieben wird, eine vierte industrielle Revolution auszulösen; zu den wesentlichen Prinzipien werden Vernetzung, Transparenz und Informationsverfügbarkeit, |

| | |
|---------------------------------|--|
| | technische Assistenz und dezentrale Entscheidungsfindung gezählt; die Schreibweise „4.0“ bezieht sich auf die in der IT übliche Versionsnummerierung |
| Job Rotation | Verfahren, bei dem Montagemitarbeiter zwischen Arbeitsstationen und Tätigkeiten rotieren, um monotone Belastungen, Eintönigkeit und reduzierte Aufmerksamkeit zu vermeiden |
| Kommissionierung | Bezeichnet in der Logistik das auftragsspezifische Zusammenstellen von bestimmten Teilmengen aus einer Gesamtmenge (Sortiment); in der Automobilmontage werden insb. bei variantenreichen Komponenten (z.B. Farbvarianten und Dekorteilen) fahrzeugspezifische Sets vorkommissioniert an die Montagelinie angeliefert, da eine sortenreine Bereitstellung aller Varianten am Band räumlich nicht möglich bzw. praktikabel wäre |
| Legacy Devices / Systems | Altsysteme, veraltete Geräte oder historisch gewachsene Lösungen, mit negativer Konnotation auch „Altlast“ |
| Line Balancing | Planungstätigkeit, bei der die Montagetätigkeiten auf die Arbeitsstationen verteilt werden; zielt darauf ab, die Auslastung der Montagemitarbeiter bei dem erwarteten Variantemix / der vorgesehenen Fahrzeugfolge zu maximieren; wird auch als Abtaktung bezeichnet |
| Machine Learning | Als maschinelles Lernen werden statistische Lernalgorithmen bezeichnet, die nicht explizit programmiert sondern deren mathematische Modelle mit großen Mengen von Beispieldaten in einem automatisierten Prozess auf ein bestimmtes Problem angepasst (trainiert) werden; sie werden eingesetzt, um Aufgaben oder Probleme zu lösen, die für heuristische, regelbasierte Ansätze zu kompliziert sind |
| Microservice | Architekturmuster für die modulare Applikationsentwicklung, bei dem komplexe Funktionalität in viele kleine unabhängige Funktionen zerlegt wird, die untereinander über sprachunabhängige Schnittstellen kommunizieren |
| Middleware | Programme, die zwischen Anwendungen vermitteln, um inkompatible Systeme zu verbinden oder Komplexität durch Abstraktion zu verbergen |
| Mixed Reality | Systeme, die die natürliche Wahrnehmung mit computergenerierten Inhalten vermischen (vgl. <i>Augmented Reality</i>) |

| | |
|--|--|
| Modellmix | Anteile der gebauten Fahrzeugtypen und Ausstattungsvarianten sowie ihre Sequenz (relevant für das Line-Balancing, da Modelle oft hinsichtlich des Montageaufwands variieren) |
| Montageassistenzsystem | Spezialform eines Werkerassistenzsystems das für die Anforderungen und Tätigkeiten in der Montage optimiert ist |
| Montagefunktionen | Klassifizierung aller in der Montage relevanten Tätigkeiten (Vgl. Kapitel 2.1.4) |
| Montagegerechte Produktgestaltung | Bedeutet, dass bei der Produktgestaltung (und Serienentwicklung) Anforderungen und Aspekte der Montage berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 4.2.1) |
| Montagehilfsstoffe | Stoffe, die bei der Montage eingesetzt werden, beispielsweise Reinigungsmittel oder Schmierstoffe |
| Montagevorranggraph | Graph, der alle geometrisch möglichen Montagefolgen eines Produkts darstellt |
| Mock-Up | Physisches Design-Modell |
| Motion Capturing | Verfahren zur sensorgestützten Aufzeichnung von Bewegungsabläufen |
| Pick by light / voice | Technologie aus dem Bereich der Logistik, die Mitarbeitern über Symbole, Lichtsignale oder Sprache Informationen bzgl. auszuführender Kommissionieraufträge übermittelt |
| Poka Yoke | Japanisch für „unglückliche Fehler vermeiden“, bezeichnet Methoden zur Steigerung der Fehlhandlungssicherheit |
| Planzeit | Auf einen bestimmten Arbeitsschritt bezogene Sollzeit; wird meist auf Basis von Zeitbausteinen / aus Tabellenwerken entnommenen, vorbestimmten Zeiten für bestimmte Tätigkeiten berechnet (vgl. MTM) |
| Prototyp | Ein, für den jeweiligen Erprobungs- oder Demonstrationszweck konzipiertes, oft vereinfachtes Versuchsmodell eines geplanten Produktes oder Bauteils |
| Ramp-up | Hochlauf der Serienproduktion eines Fahrzeugmodells (Steigerung der täglich produzierten Einheiten bis die geplanten Produktionsmengen erreicht sind) |
| Rapid Prototyping | Verfahren zur schnellen Herstellung physischer Prototypen(teile), z.B. mittels additiver Fertigung / 3D-Druck |

| | |
|---------------------------|---|
| Reifegrad | Grad, zu dem ein Entwicklungsstand die definierten Entwicklungsziele erfüllt (vgl. Kapitel 4.1) |
| Remote Support | Technische Systeme, die es einem räumlich nicht anwesenden Experten ermöglichen ein System aus der Ferne zu konfigurieren, zu warten oder Probleme zu lösen oder einen Mitarbeiter vor Ort bei diesen Tätigkeiten zu unterstützen |
| Sensor | Technisches Bauteil, das zur quantitativen oder qualitativen Erfassung physikalischer Messgrößen oder chemischer Eigenschaften eingesetzt wird (z.B. Temperatur, Feuchtigkeit, Druck, pH-Wert); auch Detektor, Fühler oder Messaufnehmer genannt |
| Sensor fusion | Sensordatenfusion bezeichnet Verfahren und Algorithmen zur Verknüpfung der Daten mehrerer Sensoren mit dem Ziel eine genauere Abbildung der Realität zu erreichen oder die Detektionsqualität zu steigern |
| Stage-Gate Prozess | Prozessmodell für die Produktentwicklung, bei dem ein Entwicklungsvorhaben in mehrere Abschnitte und Tore (<i>Gates</i>) unterteilt wird; zum Abschluss eines Abschnitts wird am <i>Gate</i> geprüft, ob die für den Abschnitt definierten Ziele erreicht worden sind und das Projekt fortgesetzt werden kann |
| State (Software) | Entwurfsmuster aus der objektorientierten Softwareentwicklung, das zur Kategorie der Verhaltensmuster (<i>behavioral design patterns</i>) zählt; wird eingesetzt, um zustandsabhängiges Verhalten zu realisieren (Zustandsautomat) |
| Takt | In der Fahrzeugserienmontage wird ein standardisierter Arbeitsbereich an der Montagelinie als Takt bezeichnet |
| Taktzeit | Zeitdauer, die (ggf. abzgl. der Ein- und Ausfahrzeiten) einem Mitarbeiter in der Serienmontage an seinem Arbeitsplatz (Takt) je Fahrzeug für die Durchführung seiner Montageaufgaben regulär zur Verfügung steht |
| Testabdeckung | Im Kontext dieser Arbeit werden Betrachtungsumfang und Betrachtungstiefe bei der Absicherung als horizontale bzw. vertikale Testabdeckung bezeichnet (vgl. Kapitel 4.1) |
| Time-to-market | Entwicklungsdauer von der Idee bis zur Verfügbarkeit des Produkts am Markt |
| Tool Tracking | Technische Verfahren zur Bestimmung der Position von Werkzeugen im Raum; kann beispielsweise eingesetzt |

| | |
|------------------------|---|
| | werden um aufgezeichnete Prozessparameter einer konkreten Verbindung zuzuordnen |
| Trigger | Auslöser, z.B. ein bestimmtes Signal eines Sensors (vgl. Eventorientierung) |
| Trim | Erster Teil der Hauptmontage, in dem der Unterbau der Rohkarosserie montiert wird; auch Karosseriemontage genannt |
| Verlobung | Im Kontext der Fahrzeugmontage wird die Vormontage der Antriebseinheit und des Fahrwerks mit den Achsen auf dem Aufrüstband als Verlobung bezeichnet |
| Virtual Reality | Technologien zur Darstellung einer vollständig virtuellen, computergenerierten Umgebung (vgl. <i>augmented</i> oder <i>mixed reality</i>) |
| View | In der Softwareentwicklung werden bestimmte Bereiche der grafischen Benutzeroberfläche als <i>view</i> bezeichnet; gleichzeitig wird der Begriff im Kontext von Datenbanksystemen auch für Auszüge (virtuelle Tabellen) verwendet |
| Wearables | Mobile Endgeräte die am Körper getragen werden, beispielsweise <i>smart watches</i> oder <i>smart glasses</i> |
| Websocket | Auf TCP basierendes Netzwerkprotokoll, das bidirektionale Verbindungen zwischen Webanwendungen und Webservern ermöglicht |
| Workflow | Räumliche und zeitliche Reihenfolge von funktional, physikalisch oder technisch zusammengehörenden Arbeitsvorgängen an einem Arbeitsplatz (Arbeitsablauf) |

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Automobilindustrie befindet sich gegenwärtig in einem tiefgreifenden Umbruch. Durch Innovationen wie das automatisierte Fahren und alternative Antriebskonzepte haben sich die Kernkompetenzen der Branche in kurzer Zeit stark gewandelt [1]. Anstelle eines komplexen Verbrennungsmotors stehen künftig Komponenten wie Elektromotoren, Batteriezellen und Software im Fokus. Die dadurch veränderten Markteintrittsbarrieren sowie sich wandelnden und regional stark unterschiedliche Kundenanforderungen (z.B. Wunsch nach individuellen Produkten, Integration von Unterhaltungselektronik und Konnektivität, Energieeffizienz und ökologische Verantwortung, *Mobility-as-a-Service*) ermöglichten es in den letzten Jahren zahlreichen neuen Anbietern innovative Produkte und Dienstleistungen auf den Markt zu bringen und etablierte Unternehmen unter Druck zu setzen. Viele dieser neuen Unternehmen stammen aus dem Umfeld der IT-Industrie und profitieren unter den gegenwärtigen Trends sowohl von ihrer Erfahrung im Bereich der Softwareentwicklung als auch der dort vorherrschenden Innovationskultur [2]. Auch Technologie-Unternehmen, wie Apple und Google, haben deutliches Interesse an dem Markt der Mobilität gezeigt [3, S. 1; 4, S. 2]. Wenngleich aus ihren Anstrengungen bislang keine marktreifen Fahrzeuge hervorgegangen sind, stellt ihr Interesse an der Kundenschnittstelle für ihre Plattformdienste in Kombination mit ihren technologischen Fähigkeiten und ihren erheblichen finanziellen Mitteln eine Bedrohung für die etablierten Automobilkonzerne dar [4, S. 2]. Der durch die neuen Anbieter verstärkte internationale Wettbewerb sowie die enormen Investitionen, die für die Entwicklung der neuen Technologien und die Transformation der bestehenden Produktionssysteme aufgewendet werden müssen verstärken den Kostendruck in der Fahrzeugentwicklung signifikant [5, S. 1015]. Um unter diesen Marktbedingungen attraktive Produkte auf dem aktuellen Stand der Technik anbieten und Gewinne erwirtschaften zu können, ist es im Kontext immer kürzer werdender technologischer Innovationszyklen erforderlich, die *time-to-market*, also die Dauer des Entwicklungsprozesses von der Idee bis zur Markteinführung, zu minimieren und etablierte Abläufe und Strukturen in der Produktion flexibler und effizienter zu gestalten [5, S. 1015; 6, S. 783-784]. Flexibilität ist auch aufgrund der bereits erwähnten Veränderung der Kundeninteressen und der Zunahme regional unterschiedlicher regulatorischer Anforderungen [4, S. 1-2] strategisch wichtig.

Die etablierten Fahrzeughersteller, auch OEMs (engl. *Original Equipment Manufacturer*) genannt, haben in dem Bestreben neue Marktsegmente zu gewinnen in den vergangenen Jahren auf eine Individualisierung ihrer Produkte gesetzt und ihre Produktpaletten stark ausgeweitet. Dadurch wurde in den Produktionssystemen eine enorme Komplexität aufgebaut, die sich durch die neuen Antriebsvarianten und den stetig wachsenden Anteil der Elektronik und Software in den Fahrzeugen nun potenziert [7, S. 6-7; 8, S. 1]. Um die große Anzahl verschiedener Modelle mit einer wirtschaftlichen Auslastung der Produktionskapazitäten herstellen zu können, werden immer häufiger *mixed-model assembly lines* (MMAL) eingesetzt. Bei diesem Ansatz werden mehrere unterschiedliche Modelle auf einer Montagelinie produziert. Dies steigert die Auslastung und Flexibilität, aber auch die Komplexität in der Produktionsplanung und -vorbereitung wie auch der Produktion selbst erheblich. [9, S. 1-2] In Verbindung mit starren Prozessen und veralteten IT-Systemen, die nie für derartige Anforderungen ausgelegt waren,

ergeben sich im Hinblick auf die angestrebte Beschleunigung der Entwicklung und die Steigerung der Flexibilität daraus zusätzliche Herausforderungen. Die oben diskutierten Trends und Herausforderungen in der Automobilindustrie sowie Beispiele für ihre Auswirkungen auf Produkt und Produktion sind in **Tabelle 1** zusammengefasst.

| Trend / Herausforderung | Auswirkung auf die Produkte | Auswirkung auf die Produktion |
|---|--|---|
| Kundenanforderungen, Individualisierung | Große Modellpalette, hohe Variantenzahl, Plattformansätze, marktspezifische Ausstattung, Integration von Dienstleistungen | Komplexität durch Varianz, Integration neuer Fertigungsverfahren (z.B. 3D-Druck) |
| Informations- und Kommunikationstechnik | Fahrerassistenzsysteme, Integration von Kommunikation und Entertainment | Komplexität durch mehr Elektronik und Software im Produkt, Digitalisierung der Produktion („Industrie 4.0“) |
| Regulierung | Alternative Antriebskonzepte, Steigerung der Energieeffizienz (z.B. Leichtbau, Aerodynamik), zusätzliche Sicherheitsfunktionen | Integration neuer Fertigungsverfahren, z.B. für Leichtbaukomponenten, Batteriezellen, Elektromotoren, sowie Brennstoffzellen und Verfahren zur Montage dieser Komponenten, Anforderungen bzgl. Dokumentation und Nachverfolgbarkeit, Arbeitsschutz, Reduzierung Energie- und Ressourcenbedarf |
| Globaler Wettbewerb | Beschleunigte Innovationszyklen | Gesteigerter Zeit- und Kostendruck, mehr Anläufe und häufige Änderungen |

Tabelle 1: Trends und Herausforderungen in der Automobilindustrie und ihre Auswirkungen auf Produkt und Produktion (i.A.a. [3, S. 3; 4, S. 2])

Innerhalb der Produktionssysteme ist die Montage in besonderem Ausmaß von diesen Trends betroffen. Ein Großteil der Variantenbildung findet während der Montage statt. Entsprechend hoch ist dort die Varianz der Komponenten. Auch die Komplexitätssteigerung durch die Zunahme an Elektronik im Fahrzeug betrifft hauptsächlich die Montage und die daran anschließende Inbetriebnahme. Die Integration neuer Antriebsvarianten unter den oftmals begrenzten räumlichen Möglichkeiten existierender Werke (sogenannter *Brown-Fields*) stellt die Montageplanung vor Herausforderungen. Neben den Materialkosten zählt die Montage zu den größten Kostenfaktoren der Fahrzeugproduktion [10]. Der Automatisierungsgrad ist deutlich geringer als in den vorgelagerten Gewerken Presswerk, Karosseriebau und Lackiererei, daher spielen Lohnkosten hier eine wesentliche Rolle. Der hohe Anteil manueller Tätigkeiten ist primär der Flexibilität geschuldet, die für die Abbildung der Produktvarianz erforderlich ist. Zu den

Ansätzen, die dabei helfen sollen die Montage zu optimieren und den Herausforderungen zu begegnen, zählt neben der Erhöhung des Automatisierungsgrades (beispielsweise durch flexible kollaborationsfähige Robotik) die Unterstützung der Mitarbeiter und die Steigerung der Transparenz durch Informationstechnik.

Die steigende Anzahl von Produktionsanläufen neuer Modelle (engl. *ramp-ups*) durch die Vergrößerung der Produktpalette und verkürzte Innovationszyklen stellt eine weitere Herausforderung für die Produktionssysteme dar [11, S. 82]. Diese kritische Phase ist häufig von kurzfristigen Änderungen, Instabilität und unvorhergesehen Problemen sowie daraus resultierenden Kosten und Verzögerungen geprägt [5, S. 1018; 12, S. 73]. Ein hoher Neuheitsgrad des Produkts bzw. der integrierten Systeme, wie er derzeit beispielsweise bei Fahrerassistenzsystemen beobachtet werden kann, wirkt sich dabei verstärkend auf die Risiken aus [13, S. 20]. Entsprechend verfehlt ein signifikanter Teil der Fahrzeugprojekte während des Anlaufs die technischen und / oder wirtschaftlichen Zielsetzungen [8, S. 1]. *Michalos et al.* kommen zu dem Schluss, dass ein schnellerer und stabilerer Anlauf- und Integrationsprozess eine der zentralen Herausforderungen für moderne Produktions- und insbesondere Montagesysteme darstellt [11, S. 82]. Auch *Schuh et al.* sehen besonders in der Anlaufphase Optimierungsbedarf [8, S. 3]. Für einen reibungslosen Anlauf der Serienproduktion ist es nicht nur erforderlich die *ramp-up* Strategie an sich, sondern auch die vorgelagerten Phasen des Produktentwicklungsprozesses (PEP) zu betrachten. Viele Defizite, die erst im Anlauf auftreten, haben ihren Ursprung in der Produktkonzept- oder der Serienentwicklungsphase, werden dort jedoch nicht erkannt. Neben funktionalen oder qualitativen Unzulänglichkeiten stellen Probleme bezüglich der Herstellbarkeit des Produkts einen wesentlichen Grund für späte Änderungen am Produktkonzept dar [14, S. 929]. Auch unzureichend erprobte Montageabläufe oder ungeeignete Betriebsmittel können Schwierigkeiten verursachen, sobald die Stückzahlen gesteigert werden. Aufgrund der Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen Produktkonzept und Produktionssystem ist der Aufwand zur Korrektur dabei umso höher, je später Defizite erkannt werden. Umgekehrt sinkt der Spielraum für Änderungen drastisch, je weiter die Entwicklung von Produkt und darauf aufbauend dem Produktionssystem fortgeschritten sind, da häufig auch andere Bauteile oder Module, Prozesse oder Produktionsmittel angepasst und erneut validiert werden müssten. Aufgrund des resultierenden drastischen Anstiegs der Änderungskosten wird dieser Zusammenhang auch als „Zehnerregel“ (engl. *rule of ten*) bezeichnet. **Abbildung 1** illustriert den Sachverhalt. Es ist daher erstrebenswert, Problemen vorzubeugen oder sie möglichst früh im PEP zu entdecken, anstatt sie später aufwändig und unter hohem Zeitdruck beheben zu müssen. [12, S. 71; 15, S. 4]

Um bestimmte Aspekte möglichst frühzeitig evaluieren zu können und Kosten für physische Versuchsaufbauten Hardware einzusparen, sind Unternehmen bestrebt verstärkt Simulationen und virtuelle Absicherungsmethoden anzuwenden. So werden beispielsweise bereits in der Produktkonzeptphase virtuelle Prüfungen der geometrischen Konsistenz auf Basis von 3D-CAD Modellen der Bauteile und Baugruppen durchgeführt. Trotz deutlicher Fortschritte bei der Simulationssoftware (insb. Benutzerfreundlichkeit und Automatisierung) ist der Aufwand für vorbereitende Datenaufbereitung und Durchführung bei derartigen Untersuchungen nach wie vor erheblich. Insbesondere im Bereich der Montageplanung ist die Erstellung und Aktualisierung der Szenarien sehr zeitintensiv, sofern die erforderlichen Modelle des Produktionssystems überhaupt vorliegen (z.B. bei Bestandsanlagen). Montagerrelevante Aspekte wie das

Verhalten flexibler Bauteile lassen sich zudem bislang nur unzureichend simulieren. In der Praxis beschränkt sich die virtuelle Absicherung bei der Entwicklung des Montagesystems bzw. der Planung der Serienintegration daher aktuell überwiegend auf die Prüfung der Zugänglichkeit der Arbeitsräume oder einzelne Szenarien mit kritischen Abläufen oder Anlagen. [11, S. 85; 16, S. 39] Auch hinsichtlich der Validierung von Simulationsergebnissen oder dem Nachweis funktionaler und sicherheitsrelevanter Merkmale (z.B. Crash-Tests, Homologation) scheint ein vollständiger Verzicht auf physische Prototypen in absehbarer Zeit nicht möglich.

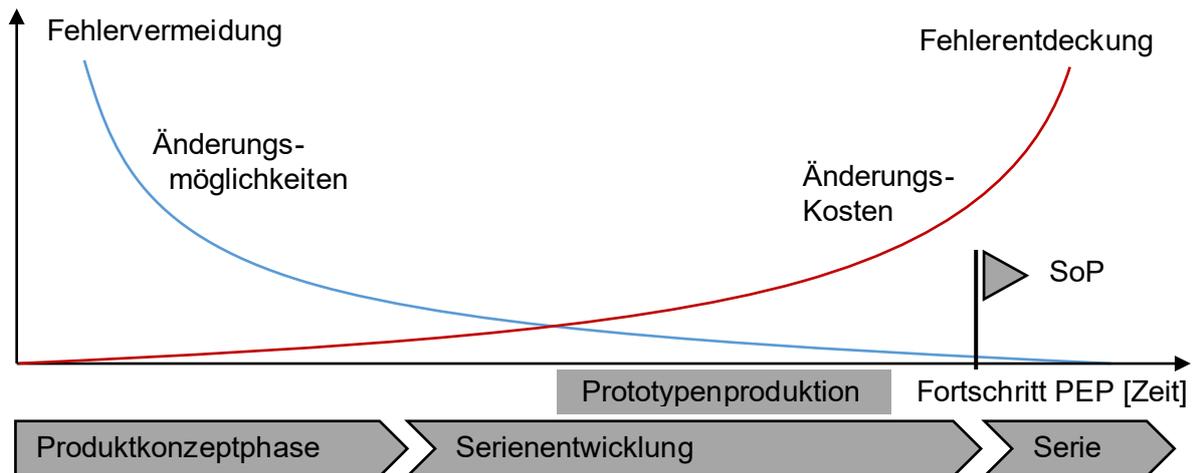


Abbildung 1: Qualitativer Verlauf der Änderungsmöglichkeiten und -kosten über die Phasen des Produktentwicklungsprozesses (i.A.a. [17, S. 1; 18, S. 543])

Die Phase der Prototypenproduktion (vgl. **Abbildung 1**) ist aus Sicht der Produktionsplanung essentiell für die Erkennung und Vermeidung von potenziellen Problemen, da sie die erste Gelegenheit bietet, Tests in der physischen Welt durchzuführen. Der zeitliche Raum für Absicherungsmaßnahmen ist jedoch begrenzt, da die Serienentwicklung möglichst schnell ablaufen soll (Minimierung der *time-to-market*) und die kostenintensiven Prototypen von den Entwicklungsfachbereichen möglichst zeitnah für Erprobungen und Versuche benötigt werden. Die Prototypen- und Vorserienmontage befindet sich daher in einem Spannungsfeld: Einerseits müssen die Prototypen so schnell wie möglich in erprobungstauglicher Qualität bereitgestellt werden, andererseits besteht von der Seite der Montageplanung und der Serienmontage die Anforderung nach möglichst umfänglicher Absicherung zur Sicherstellung eines problemlosen Serienanlaufs. Mit der vorliegenden Arbeit soll beispielhaft gezeigt werden, wie Informationstechnik eingesetzt werden kann, um beide Zielsetzungen besser zu erreichen.

1.2 Zielsetzung

Die Prototypenproduktion zeichnet sich durch eine sehr hohe Varianz bei vergleichsweise geringen Stückzahlen aus. Aufgrund der andauernden Entwicklung sind kontinuierliche Änderungen und vielfältige Probleme die Regel. Die Arbeit in diesem Umfeld ist durch einen hohen Bedarf an Expertise und Information sowie einen erheblichen Kommunikationsaufwand gekennzeichnet. Dabei stellt die Datenverfügbarkeit und -qualität in dieser frühen Phase häufig eine Herausforderung dar.

Mit dem Wachstum technologischer Fähigkeiten wird Informationstechnologie in immer neuen Anwendungsbereichen eingesetzt, von denen bislang geglaubt wurde, dass sie sich nicht für eine Computerunterstützung eignen [19, S. 180]. Die dadurch entstehenden Werkzeuge erweitern die Möglichkeiten menschlicher Problemlösung und die Fähigkeiten von Organisationen [20, S. 76]. Inwiefern die Montage von Fahrzeugprototypen im Rahmen der Serienentwicklung einen solchen Bereich darstellt und wie dort Informationssysteme effizient eingesetzt werden können, soll in dieser Arbeit untersucht werden.

Eine systematische Unterstützung der Abläufe in der Prototypenproduktion durch geeignete IT-Systeme ist bislang nicht etabliert. Die vorliegende Arbeit befasst sich daher mit der Fragestellung, wie die Prototypenmontage mithilfe von Informationstechnik effizienter gestaltet und gleichzeitig intensiver für die Prozessabsicherung genutzt werden kann. Einerseits soll damit unmittelbar der PEP beschleunigt, andererseits die Serienmontage durch ausgereifere Abläufe im Anlauf entlastet werden. Zunächst muss dazu das Umfeld näher untersucht werden, um ein grundlegendes Verständnis für die Rahmenbedingungen und Abläufe sowie die praktischen Defizite und ihre Ursachen zu gewinnen. Darauf aufbauend werden Handlungsfelder und bestehende Ansätze aus der Forschung identifiziert und ein entsprechender Lösungsansatz konzipiert. Zunächst wird jedoch im folgenden Abschnitt das dem Forschungsvorhaben zugrundeliegende Wissenschaftsverständnis und die angewandte Methodologie vorgestellt.

1.3 Forschungskonzeption

Bei dem skizzierten Thema handelt es sich um eine interdisziplinäre Herausforderung, die unmittelbar aus Defiziten in der aktuellen Praxis motiviert ist. Laut *Nunamaker et al.* wird Forschung, die durch die Anwendung von Wissen für die Lösung von relevanten Problemstellungen charakterisiert ist, in Unterscheidung zur Grundlagenforschung als angewandte Forschung bezeichnet [21, S. 90]. In diesem Sinne versteht sich die vorliegende Arbeit als angewandte Forschung. Neben Fragestellungen aus den Ingenieurwissenschaften spielt die Wirtschaftsinformatik (engl. *Information Systems Research*) eine wesentliche Rolle und auch Themen aus dem Feld der Arbeitswissenschaften sind zu Berücksichtigen. Aufgrund der zentralen Bedeutung der Informationstechnik für die vorliegende Arbeit wurde als rahmengebende Forschungsmethodologie das Konzept der *design science research* (DSR) gewählt. Diese, im Bereich der Informationstechnik weit verbreitete Methodologie wurde maßgeblich durch *H. A. Simon* geprägt [22, S. 76]. In seinem Buch „*The sciences of the artificial*“ [23] diskutiert er das Wesen der Naturwissenschaften und stellt diese designorientierten Forschungsbereichen wie den Ingenieurwissenschaften gegenüber. Er stellt fest, dass die Naturwissenschaften primär mit der Analyse von natürlichen Phänomenen und Sachverhalten befasst sind. *Designer* beschäftigen sich hingegen damit, wie künstliche, von Menschen geschaffene Dinge (Organisationen, technische und soziale Systeme, etc.) gestaltet sein müssen, um in einem bestimmten Umfeld zu funktionieren und bestimmte Ziele zu erreichen. Dabei hebt er hervor, dass Design-Aktivitäten stets auf ein konkretes Problem, eine praxisrelevante Fragestellung ausgerichtet sind und Artefakte, die aus ihr entstehen, nützlich sein müssen. Aufgrund der extremen Komplexität, die reale Designaufgaben häufig charakterisiert, schließt er, dass die Ergebnisse in der Regel nicht das globale Optimum darstellen. Aufgrund fehlender Methoden, nicht gegebener Modellierbarkeit und limitierter Rechenleistung ist es oftmals schlichtweg unmöglich das

Optimum zu bestimmen. Vielmehr stellt das Design einen Suchprozess dar, bei dem nach Lösungen geforscht wird, mit deren Hilfe hinsichtlich gegebener Anforderungen in einer bestimmten Umwelt ein zufriedenstellender Zustand (z.B. eine ausreichende Leistungsfähigkeit) erreicht oder zumindest der gegenwärtige Zustand verbessert werden kann. Im Laufe dieses Prozesses werden kontinuierlich Artefakte erzeugt und evaluiert, wobei die Ergebnisse der Evaluation als Feedback in die nächste Iteration einfließen. *Hevner et al.* bezeichnen diese iterative Vorgehensweise als *build-and-evaluate loop* [22, S. 78].

Für mit Design befasste Forschung, insbesondere in der Informationstechnik wurde aufbauend auf Simons Ausführungen von *March und Smith* [20] ein zweidimensionales Forschungs-Framework entworfen (siehe **Abbildung 2**). Sie übernehmen die grundlegende Auffassung Simons, dass Technologie, manifestiert in Implementierungen, stets einen praktischen Nutzen verfolgt und nicht rein konzeptioneller Natur ist. Als Fortschritt in der Design-Forschung betrachten sie es, existierende Technologien durch effektivere zu ersetzen [20, S. 254]. In Bezug auf Forschung im Bereich der Informationssysteme unterscheiden sie zwischen designorientierter, präskriptiver Forschung und deskriptiver Forschung. Erstere wendet bestehendes Wissen an und zielt darauf ab innovative Lösungen zu schaffen, um die Anwendungsbereiche und Leistungsfähigkeit von IT zu erweitern. Die an die Naturwissenschaften angelehnte deskriptive Forschung befasst sich hingegen damit Zusammenhänge, Artefakte und ihr Verhalten zu beschreiben und zu untersuchen, um neues Wissen zu gewinnen und das Verhalten künftiger Systeme vorauszusagen.

| | | Forschungsaktivitäten | | | |
|---|--|---|---------------------------------|---|---------------------------------------|
| Artefakte | | Entwickeln (<i>Build</i>) | Bewerten (<i>evaluate</i>) | Theorien bilden (<i>Theorize</i>) | Theorien prüfen (<i>Justify</i>) |
| Konstrukte (<i>Constructs</i>) | | | | | |
| Modelle (<i>Models</i>) | | | | | |
| Methoden (<i>Methods</i>) | | | | | |
| Instantiierung (<i>Instantiations</i>) | | | | | |
| | | Präskriptive Forschung (<i>Prescriptive Research</i>) | | Deskriptive Forschung (<i>Descriptive Research</i>) | |

Abbildung 2: Zweidimensionales DSR-Framework nach March & Smith [20, S. 255], die blaue Schattierung kennzeichnet den Bereich, auf den sich die vorliegende Arbeit fokussiert

Die erste Dimension des vorgeschlagenen Forschungsmodells bilden die vier Forschungsaktivitäten *build*, *evaluate*, *theorize* und *justify*. Während für das Design insbesondere die ersten beiden Kategorien, das Entwickeln von Artefakten (*build*) und das bewerten ihrer Leistungsfähigkeit bzw. Eignung die Zielsetzung zu erreichen (*evaluate*) von Bedeutung sind, konzentriert sich die deskriptive Forschung primär darauf Theorien zu bilden (*theorize*) und diese zu rechtfertigen bzw. zu widerlegen (*justify*). Design ist darauf ausgerichtet, zu untersuchen ob etwas funktioniert und zu bewerten, wie gut es funktioniert, während die anderen beiden Aktivitäten versuchen zu klären, warum etwas funktioniert (oder nicht). [20, S. 258]

Die Arten von Artefakten, auf die sich diese Forschungsaktivitäten beziehen können, bilden die zweite Dimension des Frameworks. Hier unterscheiden die Autoren *constructs*, *models*, *methods* und *instantiations*. Konstrukte bilden das fachspezifische Vokabular und damit die Basis einer Disziplin und beschreiben die Domäne, Problemstellungen und Lösungen. Modelle bilden die Beziehungen zwischen Konstrukten ab. Unter einer Methode wird ein regelhaftes Vorgehen verstanden, das dazu dient eine bestimmte Aufgabe auszuführen. Dabei basieren Methoden auf Modellen der Domäne wie Prozessen oder dem Lösungsraum. Als Instanziierung wird die Realisierung eines Artefakts in einer realen Umgebung bezeichnet. Sie demonstriert die Machbarkeit eines Lösungsansatzes und ermöglicht die Evaluierung der zugrundeliegenden Methoden, Modelle und Konstrukte. Dabei ist es in der Praxis für die Realisierung eines IT-Systems nicht zwingend notwendig, dass alle enthaltenen Methoden, Modelle und Konstrukte vollständig und explizit formalisiert sind. [20, S. 256-257]

Hevner et al. schlagen ein Framework für die Forschung im Bereich der Informationssysteme vor das sowohl verhaltensbasierte, deskriptive wie auch designorientierte Forschung als komplementäre Ansätze in ein kombiniertes Modell integriert (siehe **Abbildung 3**) und die Wechselwirkung und gegenseitige Abhängigkeit zwischen den beiden Stilen hervorhebt. Die Artefakte, die durch Design hervorgebracht werden und die Phänomene, die durch ihre Nutzung auftreten, bieten vielfältige Möglichkeiten die Interaktion zwischen Menschen, Organisation und Technologie zu studieren. Aus diesen Beobachtungen können Theorien und Regeln abgeleitet und Methodiken entwickelt werden, die wiederum mit präskriptivem Charakter in die Gestaltung künftiger Artefakte einfließen.

Der iterative Forschungsprozess wird maßgeblich durch das Umfeld bestimmt, in dem die Problemstellung bzw. der Betrachtungsgegenstand liegt. Die Summe der Eigenschaften, Interessen, Fähigkeiten und Zielen von Menschen und Organisationen in Relation zu den vorhandenen Technologien bildet das Problem, dem sich die Forschung widmet (von den Autoren als *Business Needs* bezeichnet). Aus dem Umfeld ergeben sich sowohl die Anforderungen an die zu entwickelnden Lösungen, wie auch die Rechtfertigung (Relevanz) der Forschungstätigkeit. Da die Leistung eines Artefakts immer von der Umwelt, in der es angewendet wird, abhängt, kann ein unzureichendes Verständnis dieser zur Entwicklung ungeeigneter Artefakte oder ungewollten Nebenwirkungen führen [20, S. 254]. Die durch vorangehende Forschung oder Übernahme aus angrenzenden Disziplinen geschaffene Wissensbasis liefert einerseits die Grundlagen für die kreative Phase der Entwicklung von Artefakten und Theorien, die etablierten Methodologien stellen auf der anderen Seite die Richtlinien für die Evaluationsphase und sichern die wissenschaftliche Stringenz. Die Evaluation erfolgt, indem die Lösung in einer adäquaten Umgebung auf die *Business Needs* angewendet wird [22, S. 81].

Als geeignete empirische Methoden werden analytische Verfahren, Simulationen, Experimente, Fall- und Feldstudien genannt. Im Bereich der Informationstechnik werden zudem häufig mathematische Beweise und rechnergestützte Ansätze (z.B. standardisierte Benchmark-Tests) genutzt [22, S. 86].

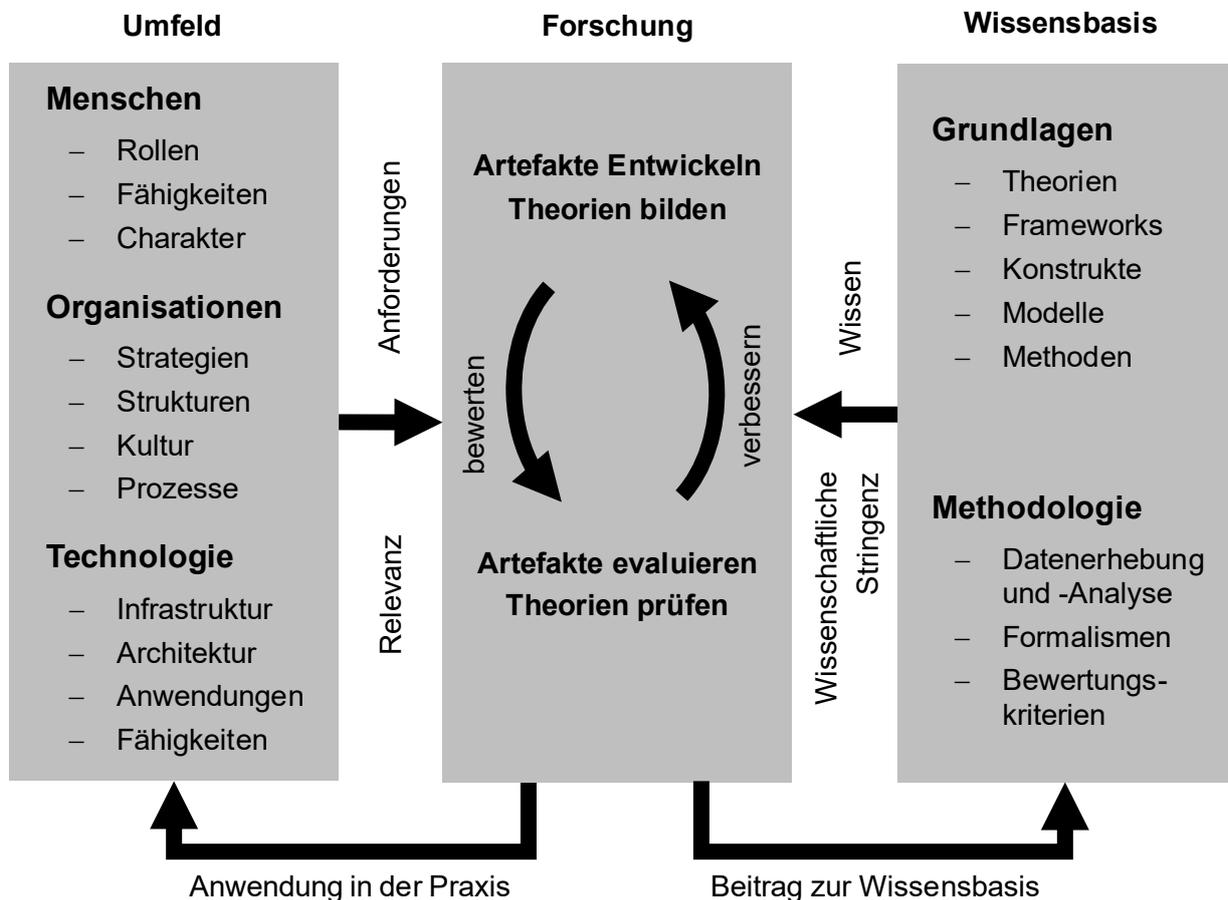


Abbildung 3: Framework für die Forschung an Informationssystemen (i.A.a. [22, S. 80])

Tabelle 2 gibt einen Überblick über Evaluationsmethoden, die im Rahmen von DSR im Bereich der Informationstechnik angewendet werden können. Neben den Evaluationsmethoden werden in der DSR-Literatur auch die Kriterien, nach denen Beiträge zu bewerten sind, diskutiert. Die Bewertung von Konstrukten betrachtet häufig ihre Vollständigkeit, Einfachheit, Eleganz, Verständlichkeit und Gebrauchstauglichkeit. Modelle müssen sich primär daran messen lassen, wie gut bzw. zu welchem Detailgrad sie die Realität (bzw. die für das jeweilige Problem relevanten Aspekte dieser) und ihre Phänomene adäquat abbilden. Auch ihre Robustheit und interne Konsistenz sind zu betrachten. Zu den für Methoden relevanten Kriterien zählen operationale Anwendbarkeit, Effizienz, Allgemeingültigkeit bzw. Generalisierbarkeit und Anwenderfreundlichkeit. Bei der Evaluation von Instanziierungen werden die Effektivität und Effizienz des Artefakts sowie seine Auswirkungen auf das Umfeld und die Nutzer untersucht.

| Methodenklasse | Methode | Erklärung |
|------------------|------------------------------------|--|
| 1. Beobachtend | 1.1 Fallstudie | Das Artefakt eingehend im Einsatz unter realen Bedingungen studieren |
| | 1.2 Feldstudie | Die Anwendung des Artefakts über mehrere Projekte hinweg beobachten |
| 2. Analytisch | 2.1 Statische Analyse | Untersuchung der Struktur des Artefakts hinsichtlich statischer Qualitätsmerkmale (z.B. Komplexität) |
| | 2.2 Architektur-Analyse | Untersuchung hinsichtlich der Kompatibilität zur technischen Architektur |
| | 2.3 Optimalität | Demonstration der Optimalität der inhärenten Eigenschaften des Artefakts |
| | 2.3 Dynamische Analyse | Untersuchung des Artefakts im Betrieb hinsichtlich dynamischer Merkmale (z.B. Leistung, Effizienz) |
| 3. Experimentell | 3.1 Experiment | Untersuchung des Artefakts in einer kontrollierten Umgebung |
| | 3.2 Simulation | Ausführung / Anwendung des Artefakts mit (künstlich generierten) Test-Daten |
| 4. Tests | 4.1 Funktionale Tests (Black-Box) | Untersuchung der Schnittstellen des Artefakts zur Suche nach Fehlern |
| | 4.2 strukturelle Tests (White-Box) | Untersuchung der Implementierung des Artefakts (z.B. Ausführungspfade) |
| 5. Beschreibend | 5.2 Argumentativ | Nutzung der Wissensbasis um eine Argumentationsstruktur für die Nützlichkeit des Artefakts aufzubauen |
| | 5.3 Szenarienbasiert | Konstruktion detaillierter Szenarien um das Artefakt und seine Anwendung zur Demonstration seiner Nützlichkeit |

Tabelle 2: Evaluationsmethoden in der DSR nach Hevner et al. [22, S. 86]

Da sich die zugrundeliegenden Konstrukte, Modelle und Methoden in der Regel nicht von der Implementierung trennen lassen, sind sie in der Bewertung enthalten. Die Instanziierung demonstriert die Realisierbarkeit und Tauglichkeit aller Bestandteile und auch des Design-Prozesses durch den sie entstanden ist [22, S. 84]. Von *Nunamaker et al.* wird die Entwicklung eines neuartigen Informationssystems daher als *proof-by-demonstration* bezeichnet [21, S. 91]. Der Fokus der Evaluation liegt nach dem DSR-Verständnis darauf zu untersuchen, wie gut ein Artefakt funktioniert und nicht Erklärungen oder Nachweise zu liefern warum es funktioniert [20, S. 261].

Neben diesem Framework stellen *Hevner et al.* sieben Richtlinien für die designorientierte Forschung an Informationssystem auf, wie in **Tabelle 3** zusammengefasst.

| | Richtlinie | Erklärung |
|---|------------------------------|---|
| 1 | Design von Artefakten | DSR muss brauchbare Artefakte in Form von Konstrukten, Modellen, Methoden oder Instanziierungen hervorbringen |
| 2 | Relevanz des Problems | Die Zielsetzung von DSR liegt darin, technologische Lösungen für wichtige und praxisrelevante Probleme zu entwickeln |
| 3 | Evaluierung des Designs | Die Nützlichkeit, Qualität und Wirksamkeit von Artefakten muss durch methodische Evaluation nachgewiesen werden |
| 4 | Forschungsbeitrag | DSR muss signifikante Beiträge in den Bereichen des Artefakt-Designs, der Design-Grundlagen oder der Methodologien liefern |
| 5 | Wissenschaftliche Stringenz | Bei der Entwicklung und Evaluierung neuer Artefakte ist methodisch vorzugehen und auf der bestehenden Wissensbasis aufzubauen |
| 6 | Design als Suchprozess | Die Suche nach einem effektiven Artefakt erfordert den Einsatz verfügbarer Mittel (Technologien, Wissensbasis), um im Rahmen der Problemumgebung die gewünschten Ziele zu erreichen |
| 7 | Kommunikation der Ergebnisse | Die Ergebnisse müssen sowohl für ein technisch- wie auch ein management-orientiertes Publikum verständlich kommuniziert werden |

Tabelle 3: Richtlinien für DSR nach Hevner et al. [22, S. 83]

Die Frage, was aus akademischer Sicht einen relevanten Beitrag ausmacht (vgl. **Tabelle 3** Punkt 4) wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Während in Bezug auf die Anerkennung von Artefakten theoretischer Natur (Konstrukte, Modelle und Methoden) sowohl in der Informations- wie auch der Computertechnik weitgehend Konsens herrscht, ist der Wert neuartiger Instanziierungen (also die Entwicklung von IT-Systemen) umstritten. Dabei wird häufig argumentiert, dass Instanziierungen lediglich eine Erweiterung bzw. Anwendung der theoretischen Elemente darstellen. In der eher anwendungsorientierten Literatur der Computertechnik dominiert hingegen die Sichtweise, dass Konstrukte, Modelle und Methoden, die in der Theorie funktionieren, nicht zwingend auch in der realen Welt anwendbar bzw. nützlich sind. Daher sind Instanziierungen als echte Nachweise der Relevanz anzusehen und der Wert von theoretischen Artefakten an der Existenz einer Implementierung zu bemessen. [20, S. 260]

Da die vorliegende Arbeit eine möglichst hohe praktische Relevanz anstrebt, wird in ihrem Rahmen die zweite Auffassung vertreten. Die Bedeutung der Entwicklung neuer Systeme als Methodologie für den wissenschaftlichen Fortschritt im Bereich der Informationssysteme wird auch von *Nunamaker et al.* [7] ausführlich dargelegt. Sie lässt sich mit folgender Aussage prägnant zusammenfassen: Ohne Forschung, die auf die Entwicklung neuer Lösungen und Systeme ausgerichtet ist, gäbe es [im Bereich der Computer- und Informationstechnik] wenig Möglichkeiten für die deskriptive Forschung. [7, S. 90]

Nach der Diskussion darüber, welche Art von Artefakt als relevanter wissenschaftlicher Beitrag anzusehen ist, bleibt zu klären, unter welchen Umständen ein entwickeltes Artefakt als wissenschaftlich wertvoll zu betrachten ist. Neben der bereits betonten Relevanz des der Forschung zugrundeliegenden Problems (vgl. **Tabelle 3** Punkt 2) und der Nützlichkeit des Artefakts in der realen Umgebung (vgl. **Tabelle 3** Punkt 3) ist die Neuheit bzw. der Grad der Innovativität dabei von zentraler Bedeutung. March und Smith argumentieren, dass die Entwicklung des jeweils ersten Vertreters einer Art als Forschung anzusehen ist, sofern das Artefakt für die Erfüllung einer wichtigen Aufgabe nützlich ist. Darauf aufbauende Entwicklungen sind danach zu beurteilen, ob sie eine signifikante Verbesserung darstellen. Auch Erweiterungen, Kombinationen oder die Anwendung auf andere Problemstellungen können relevante Forschung darstellen [20, S. 260]. *Hevner et al.* betonen in diesem Kontext, dass designorientierte Forschung von routinemäßiger Software-Entwicklung, die lediglich bekanntes Wissen und bewährte Verfahren auf das Umfeld einer speziellen Organisation anwendet, unterschieden werden muss [22, S. 81].

Das dargelegte Verständnis von angewandter Wissenschaft und die beschriebenen Frameworks der *Design Research* haben die vorliegende Arbeit grundlegend geprägt. Der konkrete Aufbau und Ablauf des Forschungsprojekts orientiert sich grob an der in **Abbildung 4** dargestellten vierstufigen Vorgehensweise, die *Blessing und Chakrabarti* [24, S. 14-17] vorschlagen.

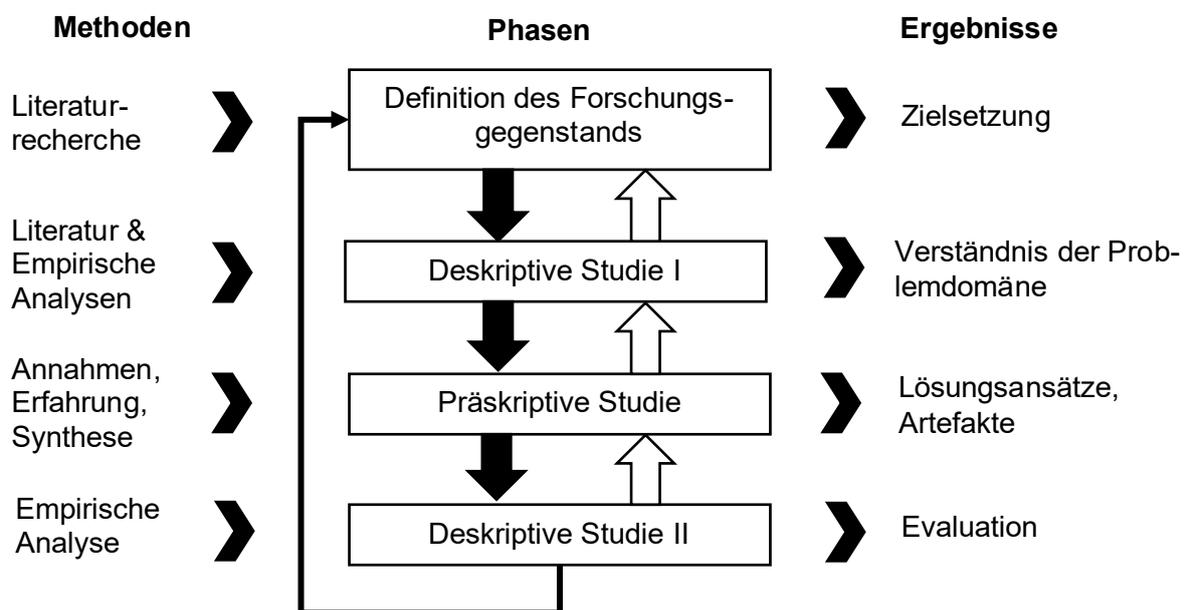


Abbildung 4: Vorgehensmodell für die designorientierte Forschung (i.A.a. [24, S. 15])

1.4 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit ist in **Abbildung 5** dargestellt. Die Abschnitte sind dabei in das oben beschriebene Forschungsmodell von *Blessing und Chakrabarti* eingeordnet. Nachdem in diesem Kapitel die Motivation für die vorliegende Arbeit dargelegt, die übergeordnete Zielsetzung formuliert und die Forschungskonzeption vorgestellt wurde, folgt im zweiten Kapitel eine Einführung in die Grundlagen der Domäne. In Kapitel 3.1 wird anhand von Literatur sowie einer Fallstudie aus der Industrie das Praxisdefizit aufgezeigt. Daran anschließend

wird im Abschnitt 3.2 der Stand der Wissenschaft mittels einer strukturierten Literaturrecherche untersucht. Daraus wird in Kapitel 3.3 der Forschungsbedarf abgeleitet. Mit der Formulierung konkreter Forschungsfragen schließt die erste deskriptive Studie ab.

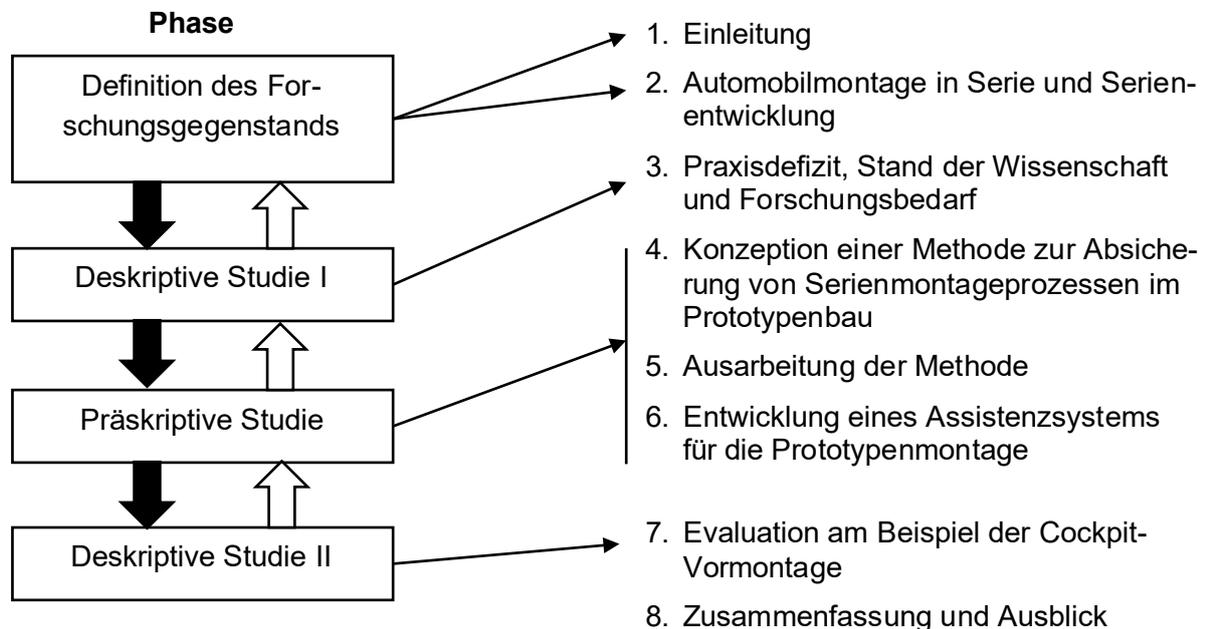


Abbildung 5: Aufbau der Arbeit und Einordnung in die Forschungsmethodik

Zu Beginn des vierten Kapitels werden die Gestaltungsoptionen bei der Prozessabsicherung in der Serienentwicklung sowie die Anwendungsmöglichkeiten von Assistenzsystemen in diesem Kontext diskutiert. Anschließend werden auf Basis des aufgezeigten Praxisdefizits und der dargestellten Gestaltungsmöglichkeiten Lösungshypothesen formuliert und Erfolgskriterien definiert, welche eine Validierung des Ansatzes im Rahmen der Deskriptiven Studie II ermöglichen sollen. Die Vorstellung des Grobkonzepts für die Absicherungsmethode basierend auf einer hypothetischen technischen Lösung schließt das Kapitel ab. In dem drauf folgenden Kapitel fünf werden die Bestandteile der Methode ausgearbeitet. Entwicklung und prototypische Implementierung eines entsprechenden Assistenzsystems sind im sechsten Kapitel beschrieben. Die Evaluation des entwickelten Lösungsansatzes im Rahmen einer Feldstudie in einem realen Industrieumfeld sowie die Diskussion der Ergebnisse bildet den Gegenstand des siebten Kapitels. Abschließend werden die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit in Kapitel acht diskutiert und Möglichkeiten für weiterführende Forschung dargestellt.

2 Automobilmontage in Serie und Serienentwicklung

Die Aktivitäten eines Automobilherstellers lassen sich, wie in **Abbildung 6** dargestellt, in fünf typische Kernprozesse unterteilen. Der kontinuierlich laufende Strategieprozess analysiert die Marktanforderungen und definiert wann und mit welcher Zielsetzung ein Fahrzeugprojekt gestartet wird. Die ebenfalls kontinuierlich laufende Vorentwicklung untersucht neue Technologien und entwickelt diese bis zu einer gewissen Reife, mit dem Ziel sie in ein künftiges Produkt zu integrieren. Wird der Start eines neuen Fahrzeugprojekts durch den Strategieprozess ausgelöst, so beginnt der fahrzeugspezifische PEP mit einer Konzeptphase. In dieser Phase werden zunächst die Anforderungen detailliert und relevante Technologien der Vorentwicklung ausgewählt, die in das Produkt einfließen sollen. In der folgenden Architektur- und Produktkonzeptphase wird der Lösungsraum durch Generierung verschiedener Lösungsalternativen aufgespannt und dann durch Auswahl bzw. Ausschluss auf ein konsistentes Konzept reduziert. Hat dieses Konzept eine gewisse Reife erreicht, startet die Serienentwicklung. Hat dieses Konzept eine gewisse Reife erreicht, startet die Serienentwicklung.

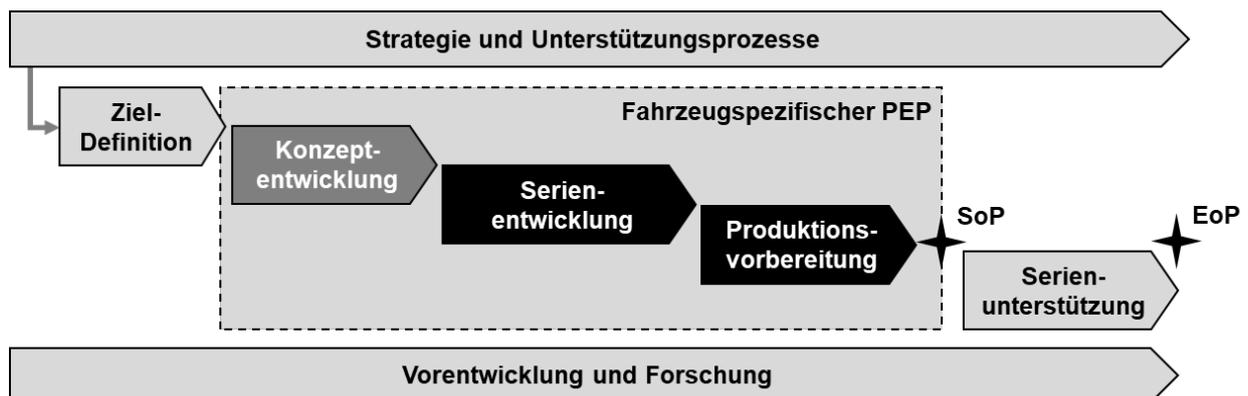


Abbildung 6: Kernprozesse der Automobilindustrie (i.A.a. [25, S. 67])

In dieser Phase werden die Bestandteile des Konzepts verfeinert und Komponenten konstruiert, bis ein virtueller Prototyp und eine funktionale Spezifikation des Produkts vorliegen. Neben virtuellen Methoden kommen dabei auch physische Prototypen, beispielsweise in Form von Laboraufbauten, Teilkarossern oder umgerüsteten Serienfahrzeugen zum Einsatz, um einzelne Komponenten oder Subsysteme zu validieren. Auf Basis des digitalen Prototypen beginnt zusammen mit der virtuellen Absicherung des Gesamtfahrzeugs auch die Montageplanung mit der Entwicklung des Montagesystems bzw. der Integration in eine bestehende Linie. Nachdem durch die virtuelle Absicherung und Komponentenerprobung die Konsistenz und grundsätzliche Tauglichkeit des Entwicklungsstandes sichergestellt ist, wird die Produktion der Gesamtfahrzeugprototypen gestartet. Je nach Neuheitsgrad und Komplexität des Produkts werden in der Prototypenphase über mehrere Monate hinweg einige Dutzend bis hunderte Versuchsfahrzeuge produziert und den Entwicklungsabteilungen für Erprobungen und Tests zur Verfügung gestellt. Ist die angeforderte Anzahl an Prototypen produziert, gehen die Produktionsabteilungen in die Phase der Serienvorbereitung bzw. Vorserie über. Neben der Feinplanung der Montageabläufe, dem sogenannten *line-balancing* findet in dieser Phase die Qualifizierung der

Serienmitarbeiter statt. Nach der Übergabe an das Serienwerk werden in der Serienumgebung unter Verwendung von Serienteilen weitere Vor- und Nullserienfahrzeuge produziert, die beispielsweise für die Homologation, als Pressefahrzeuge oder die Erstausrüstung des Händlernetzwerks genutzt werden. Der Start der Produktion der ersten Kundenfahrzeuge (engl. *start of production* - SoP) markiert den Abschluss der Serienentwicklung. Die laufende Serienproduktion wird bis zum Produktionsende (engl. *end of production* – EoP) durch die Entwicklungsabteilungen im Rahmen der Serienbetreuung begleitet, um beispielsweise auf Probleme aus dem Kundenbetrieb zu reagieren oder Optimierungsmaßnahmen umzusetzen.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Phase der Montage von Gesamtfahrzeugprototypen im Rahmen der Serienentwicklung sowie die Auswirkungen dieser auf die anschließende Serienvorbereitung mit der Vorserienproduktion im Seriumfeld bis hin zum SoP. Im Folgenden wird zunächst detaillierter auf die Fahrzeugmontage in der Serienproduktion sowie ihre Planung eingegangen, bevor die Prototypenmontage mit ihren spezifischen Rahmenbedingungen näher betrachtet wird.

2.1 Die Fahrzeugmontage in der Serienproduktion

Der folgende Abschnitt beschreibt die Fahrzeugmontage wie sie typischerweise in einem Serienwerk eines etablierten Automobilherstellers vorzufinden ist. Zu Beginn wird die Montage in den gesamten Produktionsprozess eingeordnet, anschließend ihre Struktur und die Arbeitsorganisation erläutert. Dem schließt sich die Charakterisierung typischer Montagetätigkeiten und ihre Einteilung in primäre und sekundäre Montagefunktionen sowie eine Analyse der eingesetzten Betriebsmittel an. Abschließend wird auf den Faktor Mensch sowie die Rolle von Information und Training in der manuellen Montage eingegangen.

2.1.1 Einordnung in den Produktionsablauf

Zweck der Montage ist die Erstellung mehrteiliger, zusammengesetzter Produkte aus Bauteilen oder vormontierten Baugruppen. Im Gegensatz dazu wird die Herstellung einteiliger Produkte als Fertigung bezeichnet. [26, S. 24] Zusammen bilden die Einzelteillfertigung und die Montage die Kernbereiche der Produktion. [27, S. 192] Im weiteren Sinne werden häufig auch angrenzende Bereiche wie die Logistik oder die Produktionsplanung und -steuerung zur Produktion gezählt. Die Automobilproduktion ist typischerweise in die vier Hauptbereiche Presswerk, Karosseriebau, Lackiererei und Montage gegliedert. Hinzu kommt die Fertigung von Komponenten und die Vormontage von Baugruppen. Der Fluss des Produkts durch diese Gewerke ist in **Abbildung 7** schematisch dargestellt.

Die Fertigung und Vormontage der komplexen Antriebskomponenten (z.B. Verbrennungsmotoren, Elektromaschinen, Brennstoffzellen, Energiespeicher) findet in der Regel in separaten Bereichen oder sogar eigenen Werken statt. Teilweise werden diese Komponenten auch von Lieferanten bezogen. Zudem betreiben einige Hersteller dedizierte Komponentenwerke, die Bauteile bestimmter Fertigungsverfahren (beispielsweise Gussteile oder Spritzgusskomponenten) zentral für das Produktionsnetz fertigen und auch Vormontagen ausführen.

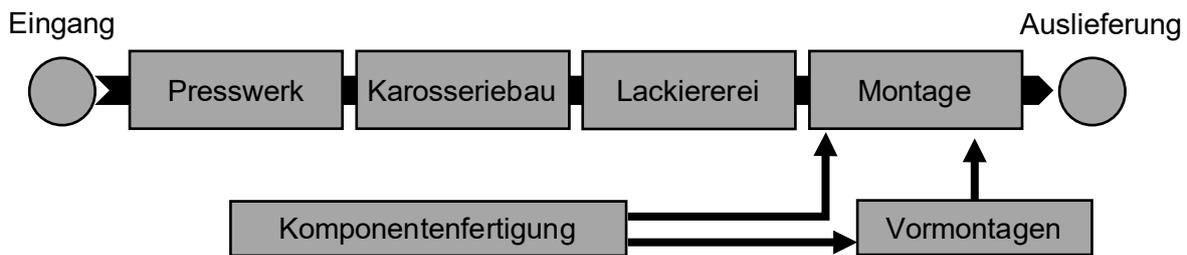


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Gewerke und der Struktur in der Automobilproduktion

Den Anteil an der gesamten Wertschöpfung, den ein OEM selbst erbringt, bezeichnet man als Fertigungstiefe. Er schwankt signifikant zwischen den OEMs: Während er bei den amerikanischen und asiatischen Herstellern teilweise mehr als 50 % beträgt, liegt er unter den europäischen Produzenten aktuell bei etwa 20 - 30 %. Dies zeigt, dass der überwiegende Teil der Wertschöpfung durch die Zulieferindustrie erbracht wird, die in zunehmendem Maß auch Entwicklungstätigkeiten übernimmt. Zwischen 1990 und 2000 hat sich der Mittelwert der Fertigungstiefe deutscher OEMs von 33 % auf 25 % reduziert. [28, S. 37]

Aufgrund aktueller Trends wie der Elektromobilität und dem hochautomatisierten Fahren, die Expertise erfordern, welche bei den OEMs nicht überall in ausreichendem Maße vorhanden ist, hat sich dieser Trend noch verstärkt. So werden in zunehmendem Umfang ganze Subsysteme und Software-Komponenten von hoch-spezialisierten Lieferanten entwickelt und produziert. Um die Lagerhaltung in den Fahrzeugwerken zu minimieren, erfolgt die Anlieferung der Komponenten nach dem *just-in-time* (JIT) bzw. *just-in-sequence* (JIS) Prinzip, die Komponenten werden also zum Bedarfszeitpunkt in der benötigten Variante in direkter räumlicher Nähe zum Montageort angeliefert. Der Verzicht auf Lagerhaltung spart Kosten, führt aber gleichzeitig zu einer hohen Sensibilität der Produktion gegenüber Störungen in der Lieferkette. Um die komplexen logistischen Anforderungen erfüllen zu können, haben sich in der Umgebung vieler Fahrzeugwerke Zulieferer mit ihren Produktionsstätten angesiedelt.

Tabelle 4 beschreibt die Gewerke bzw. Produktionstechnologien, die typischerweise in einem Fahrzeugwerk eines OEMs anzutreffen sind. Sie unterscheiden sich stark hinsichtlich der eingesetzten Technologien, den erforderlichen Produktionsmitteln und dem Automatisierungsgrad sowie den Planungs- und Steuerungsmethoden. Während die Abläufe in Presswerk, Rohbau und Lackiererei weitgehend automatisiert sind, was einen entsprechend hohen Kapitaleinsatz erfordert, sind die Vor- und Hauptmontagen überwiegend auf menschliche Arbeitskraft angewiesen. Automatisierungsgrad und Variantenvielfalt verlaufen reziprok: Die Automatisierung der variantenreichen Endmontage ist deutlich komplexer als beispielsweise die des Presswerks und bislang aufgrund der erforderlichen Flexibilität und den durch die Varianz bedingten technischen Herausforderungen kaum ausgeprägt.

| Gewerk / Technologie | Beschreibung |
|----------------------|---|
| Komponentenfertigung | Herstellung von Teilen durch Urformen (Guss, Additive Fertigung) und mechanische Bearbeitung (Umformen, Trennen und Fügen, wobei hauptsächlich spanende Fertigungstechniken zum Einsatz kommen) |
| Vormontagen | Vormontage von Antriebskomponenten (Motor, Getriebe, Achsen, Energiespeicher, etc.) und Einbauteilen (z.B. Sitze, Spiegel, Cockpit, Kühler) |
| Presswerk | Herstellung von geformten Blechteilen durch Umformung und mechanische Bearbeitung (Pressen, Stanzen etc.) |
| Karosseriebau | Herstellung der Rohkarosse (Hauptsächlich durch Fügeprozesse wie Schweißen, Kleben und Nieten) |
| Lackiererei | Beschichtung der Rohkarosse in mehreren Schritten |
| Montage | Montage des Fahrzeugs, Inbetriebnahme und Prüfung |

Tabelle 4: Die Gewerke der Automobilproduktion und ihre Aufgaben (i.A.a. [7, S. 9])

Die Flexibilität, insbesondere im Hinblick auf neue Modelle und Varianten ist dabei in Presswerk und Lackiererei trotz des hohen Automatisierungsgrades recht hoch. So lässt sich die Fertigung im Presswerk durch neue Werkzeugeinsätze mit vergleichsweise geringem Aufwand umstellen, während im Karosserierohbau häufig größere Umbaumaßnahmen und entsprechende Produktionsunterbrechungen erforderlich sind. Einen qualitativen Vergleich zwischen den Gewerken gibt **Abbildung 8**.

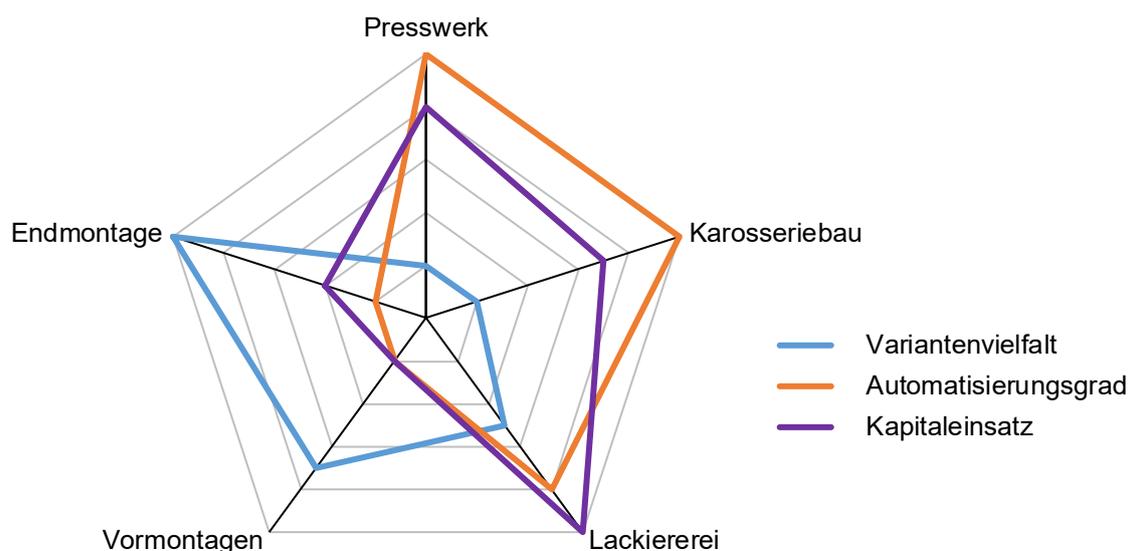


Abbildung 8: Vergleich der Gewerke der Automobilproduktion hinsichtlich Automatisierungsgrad, Kapitaleinsatz und Variantenvielfalt (i.A.a. [7, S. 10])

2.1.2 Struktur der Fahrzeugendmontage

Zur Fahrzeugendmontage werden in dieser Arbeit alle Montageumfänge gezählt, die üblicherweise in einem Fahrzeugwerk eines OEMs anzutreffen sind. Die meist ausgelagerte, dezentrale Vormontage von Komponenten (wie z.B. den Sitzen) wird nicht berücksichtigt. Die Endmontage umfasst üblicherweise folgende Bereiche (i.A.a. [7, S. 11; 29, S. 10-11; 30, S. 571]):

- **Zentrale Vormontagen:** Parallel zur Hauptmontagelinie erfolgt die Vormontage von Cockpit, Türen und Frontend (Kühlergrill mit Verkleidungen und Scheinwerfern).
- **Aufrüstband (Verlobung):** Ebenfalls parallel zur Hauptmontageband erfolgt die Vormontage der Antriebseinheit (auch als Aufrüstband oder Verlobung bezeichnet) durch Fügen des Motors, des Getriebes, der Achsen und ggf. des Energiespeichers auf einem Werkstückträger
- **Trim (Karosseriemontage):** Die Schwenkmontage als Teil der Karosseriemontage stellt den ersten Bereich der Hauptmontage dar, in dem der Unterbau der Rohkarosserie montiert wird (z.B. Brems- und Treibstoffleitungen, Tank). Anschließend beginnt der Innenausbau (Hauptkabelbaum, Dämmung, Gurte, Teppiche, Cockpiteinbau, Türen, Scheiben, etc.).
- **Chassis:** In der Chassis-Montage erfolgt der Einbau der vormontierten Antriebseinheit in das Fahrzeug (Hochzeit), sowie der Ausbau des Motorraums
- **Final:** Dieser letzte Bereich der Endmontage umfasst abschließende Montagearbeiten im Innenraum, den Einbau des Frontends, die Montage der Räder sowie diverse Justagen (z.B. an Türen und Klappen). Anschließend folgt die Befüllung (Betriebs- und Treibstoffe) und die Inbetriebnahme im sogenannten End-of-Line Bereich (EoL) mit der Einstellung der Spur (Rollenprüfstand) und der Scheinwerfer sowie abschließenden Qualitätskontrollen.

Der Ablauf und die Bezeichnungen variieren in der Literatur sowie zwischen verschiedenen OEMs, der generelle Aufbau ist jedoch ähnlich. **Abbildung 9** stellt die Struktur schematisch dar. Die Hauptlinie und überwiegend auch die Vormontagebereiche sind in der Serienproduktion als Fließmontage organisiert. Dies bedeutet, dass das Montageobjekt mittels Fördertechnik kontinuierlich von einem Arbeitsbereich zum nächsten transportiert wird und sich auch die Mitarbeiter innerhalb der Grenzen ihres jeweiligen Arbeitsbereichs mit dem Montageobjekt bewegen. [29, S. 7] Diese Organisationsform wurde durch Henry Ford 1913 erstmalig im großen Stil für die Fertigung des Modell T eingesetzt und in den 20er und 30er Jahren von anderen Herstellern übernommen. Als Teil des „Toyota Produktionssystems“ hat sich die manuelle Fließbandmontage in den 70er und 80er Jahren als das erfolgreichste Modell durchgesetzt [7, S. 27]. Versuche alternative Montageformen zu etablieren, beispielsweise autonom agierende Arbeitsgruppen bei Volvo in Uddevalla (70er und 80er Jahre) sowie eine hochautomatisierte Montage bei Volkswagen (Golf II, 90er Jahre) oder zuletzt 2018 bei Tesla (Modell 3) scheiterten hingegen bislang [7, S. 25].

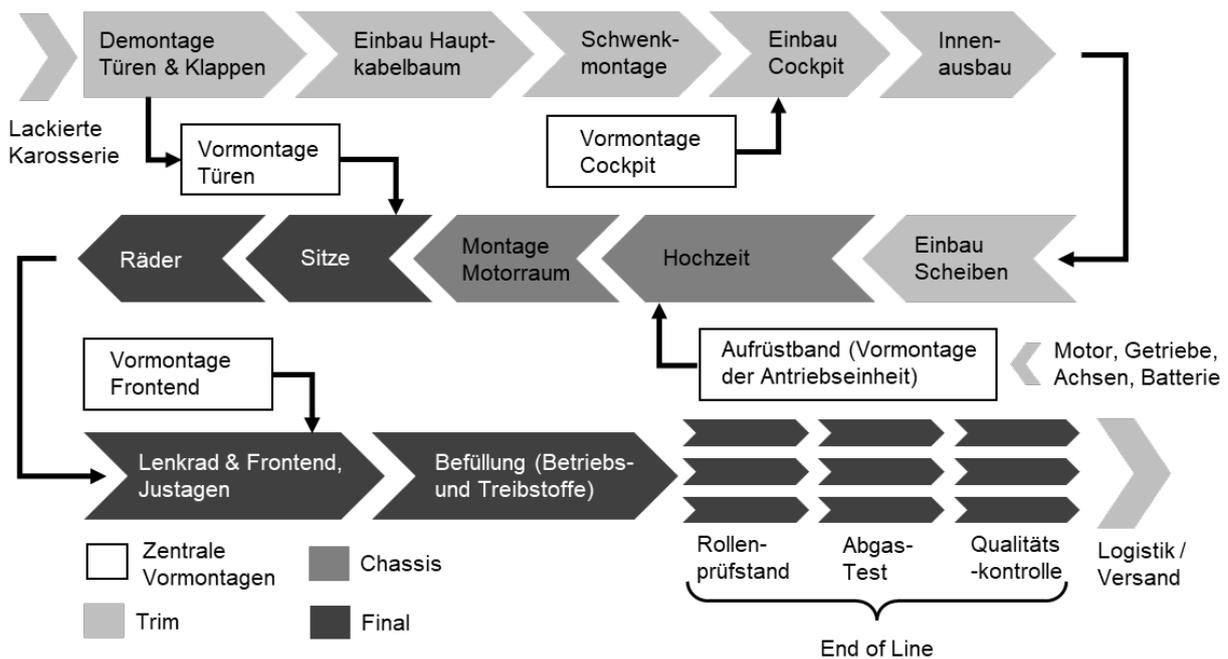


Abbildung 9: Struktur und Bereiche der Fahrzeugmontage in einem Serienwerk (i.A.a. [30, S. 571])

2.1.3 Arbeitsorganisation

Die Fließmontage ist durch eine extrem hohe Arbeitsteiligkeit gekennzeichnet. Jeder Montagemitarbeiter führt an einem Fahrzeug nur wenige Arbeitsschritte aus, diese jedoch mit einem hohen Grad an Routine und entsprechender Geschwindigkeit. Die als Taktzeit bezeichnete Montagedauer in einem Arbeitsbereich liegt üblicherweise zwischen 60 und 180 Sekunden. Als Takt wird ein räumlicher Abschnitt der Montagelinie bezeichnet. An einem Takt können sich mehrere Arbeitsplätze in unterschiedlichen Arbeitsräumen (beispielsweise vor, hinter oder im Fahrzeug) befinden. Auch eine Kollaboration mehrerer Werker in einem Arbeitsraum ist möglich. Die Werker sind entlang der Montagelinie in Teams organisiert, die mehrere Takte umfassen. Sie werden durch einen Vorarbeiter koordiniert und rotieren innerhalb des Teams regelmäßig ihre Arbeitsplätze (*job rotation*). Dies dient der Vorbeugung monotoner Belastung, Aufrechterhaltung der Aufmerksamkeit und Motivation sowie Flexibilisierung. Der Betrieb erfolgt üblicherweise im 2- oder 3-Schichtmodellen, wobei der Produktionsplan laufend an die jeweilige Nachfrage bzw. Auftragslage angepasst wird. Diese Organisationsform bedingt festgelegte Anwesenheits-, Arbeits- und Pausenzeiten für alle Montagemitarbeiter. [31, S. 21]

Der Montageaufwand und die benötigte Montagezeit für ein bestimmtes Fahrzeug an einem Arbeitsplatz ist oftmals abhängig von der Fahrzeugkonfiguration (z.B. der zu verbauenden Sonderausstattung). Um eine möglichst gleichmäßige Auslastung der Montagemitarbeiter zu erreichen, werden daher Fahrzeuge mit hohem und niedrigem Montageaufwand abwechselnd so in die Endmontage eingesteuert, dass die durchschnittliche Montagezeit pro Arbeitsplatz unter bzw. möglichst nahe an der Taktzeit der Montagelinie liegt. So kann ein Werker bei einem aufwändigeren Fahrzeug in den nachfolgenden Bereich driften und diese Überlastung beim folgenden Fahrzeug mit geringerem Umfang ausgleichen. Dieses Steuerungskonzept wird

auch *Line-Balancing* genannt, wobei die Fahrzeuge in der Regel ihre Reihenfolge über den gesamten Montageablauf beibehalten. [32, S. 390]

2.1.4 Montagefunktionen

Die Tätigkeiten in der Montage lassen sich in primäre Funktionen, die der Vervollständigung des Produkts dienen sowie sekundäre, unterstützende Montagefunktionen unterteilen. **Abbildung 10** veranschaulicht die Unterteilung der Montagetätigkeiten und listet einige für die Automobilmontage relevante Beispiele auf.

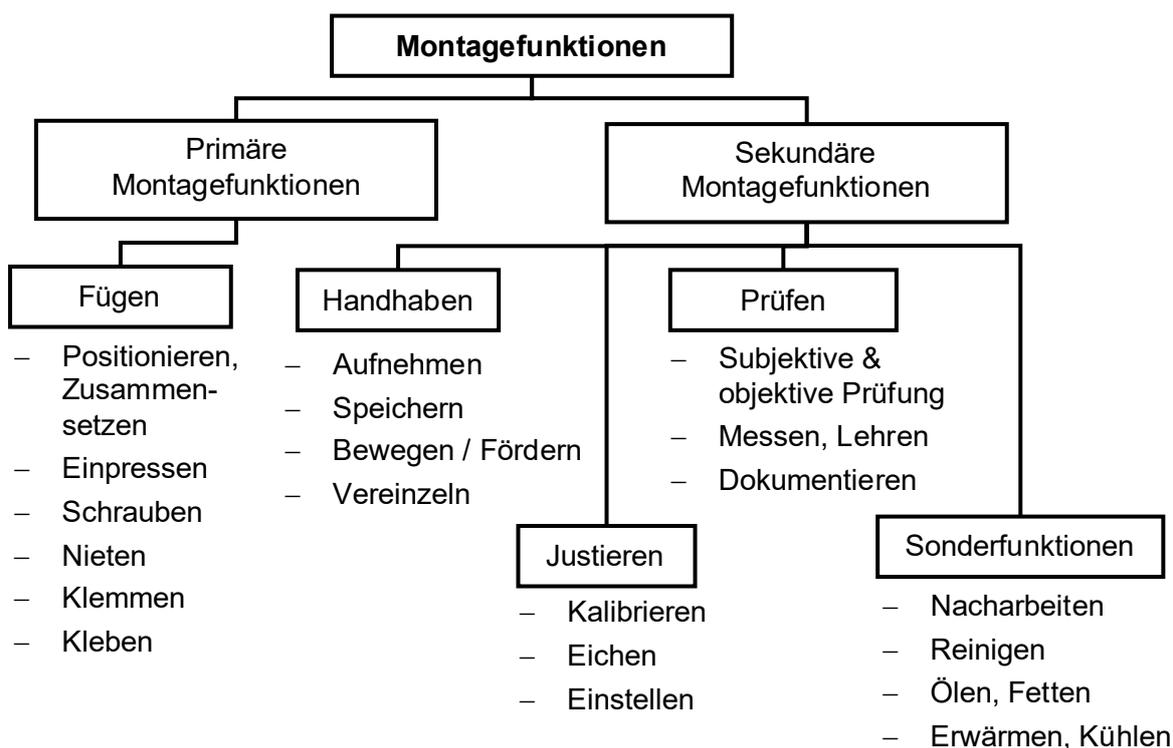


Abbildung 10: Primäre und sekundäre Montagefunktionen (i.A.a. [33, S. 591])

Als Primärmontage wird das Fügen von Bauteilen zu einer Baugruppe oder einem Enderzeugnis bezeichnet. Sie umfasst alle Arbeitsoperationen, die das Montageobjekt physisch verändern und der unmittelbaren Wertschöpfung dienen. Fügen bezeichnet das langfristige Verbinden mehrerer Werkstücke, wodurch lokal an den Fügestellen Zusammenhalt zwischen den vorher getrennten Komponenten geschaffen wird. Fügeverfahren und ihre Klassifizierung werden in der DIN 8593-0 beschrieben. In der Automobilmontage sind primär (bedingt) lösbare Schraub- und form- bzw. kraftschlüssige Clip-Verbindungen sowie in geringerem Umfang Klebeverbindungen anzutreffen, während in der Karosseriefertigung überwiegend unlösbare Schweiß-, Niet- und auch zunehmend Klebeverbindungen zum Einsatz kommen. [33, S. 590 ff.; 34] Vorgänge wie das Handhaben, Prüfen, Justieren und sonstige Hilfsoperationen, die den Montagevorgang unterstützen aber nicht unmittelbar der Vervollständigung dienen werden als sekundäre Montagefunktionen bezeichnet. Tätigkeiten der Sekundärmontage sollten möglichst auf ein Minimum reduziert werden, da sie nicht direkt zur Wertschöpfung beitragen. Das Verhältnis von Primär- und Sekundärmontage wird daher auch als Montagewirkungsgrad

bezeichnet. [35, S. 59 ff.] In **Tabelle 5** sind beispielhaft die Zeitanteile der wichtigsten primären und sekundären Tätigkeiten in der Montage der BMW 3er Limousine aufgelistet.

| | | |
|--|---|--------|
| Primäre, wertschöpfende Montagetätigkeiten | Aufnehmen und positionieren | 26,0 % |
| | Schraubarbeiten | 21,4 % |
| | Leitungen verlegen / kontaktieren | 5,5 % |
| | Verclipsen / Verrasten | 4,4 % |
| | Kleben | 0,9 % |
| | Dichten | 0,4 % |
| | Sonstige Tätigkeiten | 3,1 % |
| | Summe | 61,7 % |
| Prozessunterstützende Tätigkeiten, Logistikmaßnahmen | Handhabung von Werkzeugen und Montagehilfsmitteln | 10,2 % |
| | Anbauteile / Material aus Bereitstellung holen | 9,5 % |
| | Körperbewegung im und um das Montageobjekt | 8,6 % |
| | Unbeeinflussbare Warte- und Prozesszeiten | 2,3 % |
| | Anlagenbedienung | 1,3 % |
| | Markieren und Dokumentieren | 1,3 % |
| | Visuelle Kontrolle | 1,2 % |
| | Lesen / erfassen von Arbeitsanweisungen | 0,9 % |
| | Leitungen temporär fixieren / zurückbinden | 0,8 % |
| | Montagehilfsstoffe auftragen | 0,7 % |
| | Behälter handhaben | 0,4 % |
| | Reinigen | 0,4 % |
| | Sonstige Tätigkeiten | 0,6 % |
| | Summe | 38,3 % |

Tabelle 5: Analyse der Zeitanteile primärer und sekundärer Montagetätigkeiten in der Montage der BMW 3er Limousine (F30) im Stammwerk München (BMW Group Juni 2018)

Nach VDI 2860 bezeichnet der Begriff der Handhabung das Schaffen, Verändern oder die temporäre Aufrechterhaltung einer definierten räumlichen Anordnung und Orientierung geometrisch bestimmter Körper. Das Handhaben unterscheidet sich von Lagern und Fördern durch die definierte Orientierung. Es beschreibt Bewegungen beim Einleiten oder Beenden von Vorgängen der Fertigung und Montage sowie des Transports und umfasst die Teilfunktionen Speichern (kurzzeitiges Lagern), Mengen verändern, Bewegen (Schaffen bzw. Verändern der räumlichen Anordnung), Sichern (Aufrechterhalten einer räumlichen Anordnung) und

Kontrollieren. [36] In der Fahrzeugmontage bezieht sich der Begriff der Handhabung sowohl auf Anbauteile und Baugruppen wie auch auf Betriebsmittel und Montagehilfsstoffe (z.B. Reinigungs- oder Gleitmittel). Die zu verbauenden Komponenten werden in der Regel durch die Logistik seitlich an der Montagelinie in Regalen oder Transportbehältern bereitgestellt, aus welchen sie die Monteure bei Bedarf entnehmen. In besonders variantenreichen Zonen kommen aufgrund der begrenzten Bereitstellungsflächen auch fahrzeugspezifisch vorkommisionierte Teile-Sets zum Einsatz.

Die Montagezeit stellt eine der zentralen Kennzahlen der Montage dar. Aus ihr lässt sich ableiten, wie viele Arbeitsstationen und Mitarbeiter erforderlich sind und mit welcher Taktzeit in einem Montagesystem eine bestimmte Stückzahl erreicht werden kann. Dadurch bestimmt sie einen wesentlichen Teil der Montagekosten. **Abbildung 11** illustriert die Zusammensetzung.

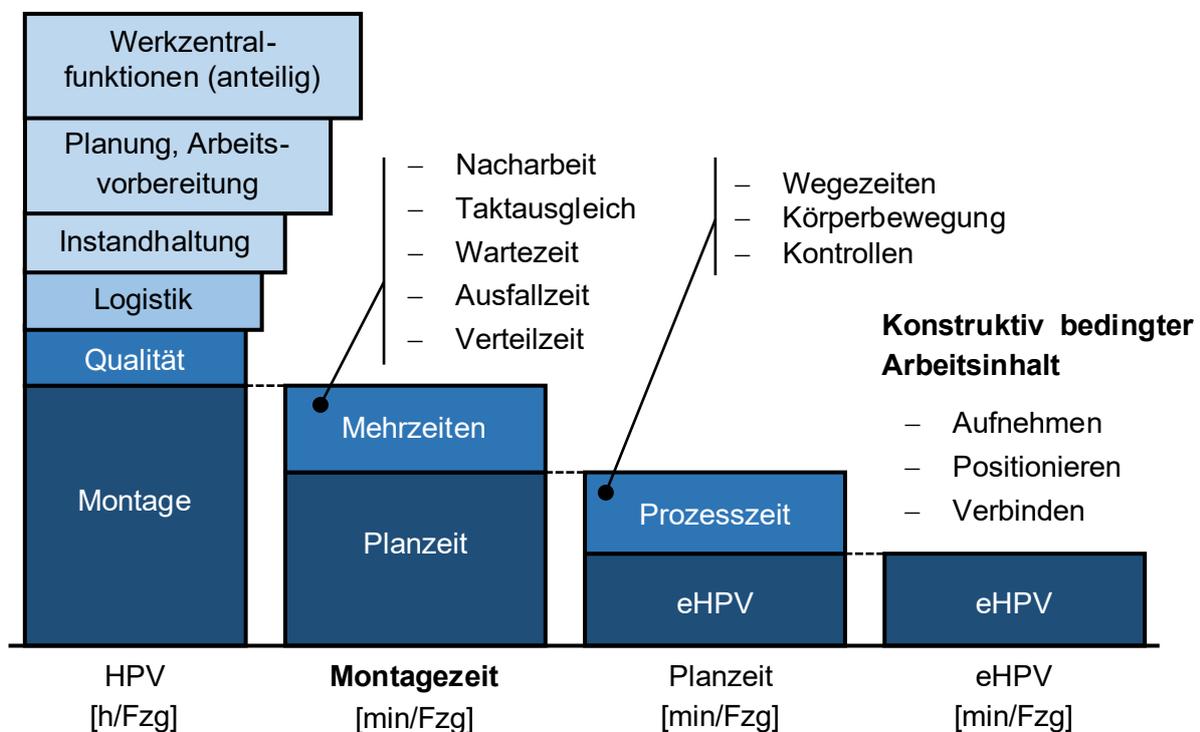


Abbildung 11: Zeitbewertung in der Automobilmontage (i.A.a. [37, S. 8])

Die Summe aus primären Montagefähigkeiten und dem konstruktiv beeinflussten Anteil der sekundären Montagefunktionen bildet den konstruktiv bedingten Arbeitsinhalt eines Fahrzeugs, auch *engineered Hours per Vehicle* (eHPV) genannt. Die Summe aller primärer und sekundärer Montagefähigkeiten, die im Idealfall für die Fahrzeugmontage erforderlich sind, wird als Planzeit bezeichnet. Diese Zeit wird im Rahmen der Montageplanung berechnet bzw. abgeschätzt und bildet die Grundlage für die Auslegung der Montagelinie sowie die Abtaktung (Zuweisung von Tätigkeiten auf Arbeitsstationen / Monteure).

Für die Bestimmung der Montagezeit sind in der Praxis zusätzliche Mehrzeiten wie Wartezeiten, Nacharbeit oder Ausfälle der Produktionsmittel einzubeziehen. Um den gesamten direkten und indirekten Personalaufwand für die Fahrzeugmontage, die *Hours per Vehicle* (HPV) zu

bestimmen, müssen schließlich noch die Logistiktätigkeiten, Qualitätsmaßnahmen sowie anteilig die indirekten Tätigkeiten in Montageplanung, Arbeitsvorbereitung und den Werkszentralfunktionen berücksichtigt werden. [37]

2.1.5 Betriebsmittel

Wenngleich der Automatisierungsgrad in der Montage deutlich niedriger liegt als in anderen Bereichen der Fahrzeugproduktion, sind auch hier zahlreiche Betriebsmittel anzutreffen. Die Fördertechnik, die die Karosserie bzw. später das Fahrzeug stehend oder hängend von Arbeitsstation zu Arbeitsstation transportiert oder große Komponenten wie Sitze und Cockpit an die jeweiligen Montagestationen liefert zählt dabei mehr zum Aufgabengebiet der Gebäude- und Strukturplanung, als zur Montageplanung selbst. In der Mehrzahl der Fahrzeugprojekte ist das Montagesystem bereits vorgegeben (*brown-field* Projekte) und der Spielraum für Anpassungen ist aufgrund hoher Investitionskosten und der erforderlichen Produktionsunterbrechung gering. Ähnlich verhält es sich mit Großanlagen und Automatikstationen wie beispielsweise der Hochzeitsanlage zur automatisierten Verschraubung von Fahrwerk und Karosserie oder den Prüfständen und Befüllanlagen am Bandende.

Bei der Planung der manuellen Montageumfänge stehen daher Standardwerkzeuge, wie Handschrauber und digitale Schraubanlagen, kleinere Automatanlagen, Montagevorrichtungen und Handhabungsgeräte (zur Bewegung großer, sperriger oder fragiler Lasten) im Fokus. Um die Montageabläufe zu optimieren und diffizile Tätigkeiten zu erleichtern, werden verschiedenste Arten von Hilfsmitteln wie beispielsweise Transportbeutel und Fädelhilfen für Kabelbäume, Lehren für die Ausrichtung und Platzierung oder Schmierstoffe eingesetzt. Aufgrund der steigenden Anforderungen der Arbeitsergonomie sind zunehmend Lösungen wie bewegliche Sitze oder Exoskelette für die Arbeit in ergonomisch ungünstigen Positionen, Aufnahmen für Schrauber mit hohem Drehmoment sowie tätigkeitsspezifische Schutzausrüstung anzutreffen. Diese Hilfsmittel, die nicht in den Bereich der Anlagen oder Standardwerkzeuge fallen, werden auch als Sonderbetriebsmittel (SBM) bezeichnet. Auch Mittel, die dem Schutz des Produkts gegen versehentliche Beschädigung während der Montage dienen (z.B. Verkleidungen für Werkzeuge oder empfindliche Bereiche des Fahrzeugs), zählen zu den Sonderbetriebsmitteln. Systeme für die Codierung und Funktionsprüfung der Fahrzeugelektronik sind ebenso wie Prüftechnik (z.B. Scanner zur Bauteilidentifikation oder Kameras für automatisierte Qualitätskontrollen) in der gesamten Montage verbreitet.

Die Vielzahl der zunehmend intelligenten, also mit Sensorik und Datenverarbeitung ausgestatteten Betriebsmittel steigert die Transparenz in der Montage und eröffnet vielfältige Möglichkeiten bei der Identifikation und Analyse von Optimierungspotenzialen und Qualitätsproblemen. Bei der Integration in übergeordnete Produktionsleitsysteme wie auch bei der Instandhaltung stellen sie jedoch oftmals eine Herausforderung dar. Der Einfluss der Digitalisierung auf die Fahrzeugmontage wird im Abschnitt 2.3 ausführliche diskutiert.

Um die Mitarbeiter bei der stetig steigenden Komplexität und Varianz in der Montage zu unterstützen, haben sich verschiedenste Informationssysteme etabliert. Die Bandbreite reicht dabei von einfachen Variantenanzeigen, *pick-by-light* und *pick-by-voice* Systemen, über mobile Geräte zur Fahrzeugidentifikation und Konfigurationsanzeige bis hin zu umfangreichen

Assistenzsystemen. Im folgenden Abschnitt wird detaillierter auf dieses Thema und allgemein die Bedeutung von Information in der Montage eingegangen.

2.1.6 Qualifizierung, Information und Fehler in der Montage

Die Konzeption und Ausgestaltung eines Montagesystems durch die Montageplanung bestimmt maßgeblich seine Leistungsfähigkeit, den Auslastungsgrad und damit letztlich die Montagekosten. Aufgrund des hohen Anteils manueller Arbeit spielt in der Praxis aber auch der Faktor Mensch eine wesentliche Rolle.

Die Tätigkeiten des Menschen in der Montage bestehen sowohl aus motorischen wie auch sensorischen Anteilen, sie werden daher auch als sensumotorisch bezeichnet. Die wahrgenommenen Informationen wirken regulierend auf die ausgeführte Handlung ein. Die für diese Tätigkeiten erforderlichen Fähigkeiten erlangen und verbessern die Werker durch Lernen und Üben. [38, S. 347] Der Verlauf der Arbeitsleistung während der Lernzeit ist in **Abbildung 12** schematisch dargestellt.

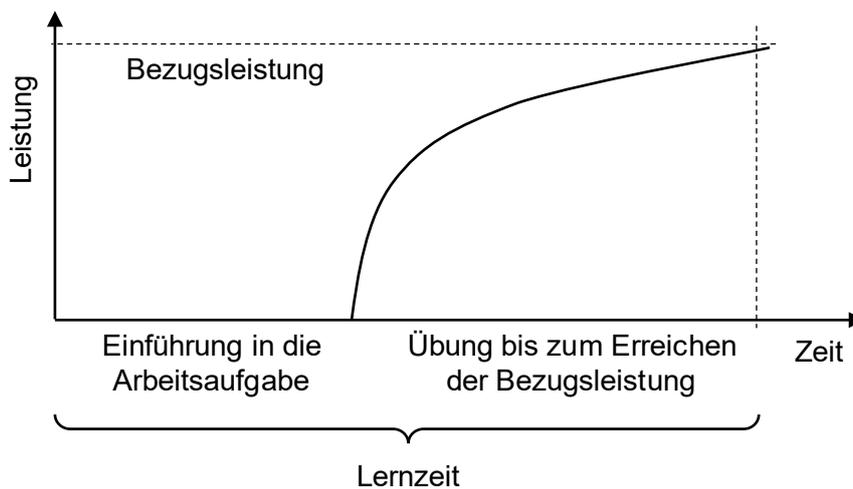


Abbildung 12: Entwicklung der Arbeitsleistung während der Lernzeit (i.A.a. [39])

Wird ein Werker mit einer für ihn neuen Arbeitsaufgabe betraut, muss er diese zunächst kennenlernen. Anschließend beginnt er mit der Ausführung, wobei sich die Arbeitsleistung mit steigender Anzahl der Arbeitsausführungen der Bezugsleistung annähert, bei deren Erreichen er bezüglich der Arbeitsaufgabe als qualifiziert betrachtet wird. Der Verlauf der Lernkurve ist dabei individuell und unterliegt einigen Einflussfaktoren, beispielsweise den Eigenschaften des jeweiligen Werkers (Anatomie, Alter, Persönlichkeit, Wissen und Erfahrung, Fertigkeiten, Motivation, etc.), dem Charakter der Arbeitsaufgabe (Anzahl, Gestalt und Varianz der involvierten Objekte, Art der erforderlichen Bewegungen, Arbeitsumfeld) und der Lern- bzw. Lehrmethode (selbstständiges Lernen oder Lernen unter Anleitung, Art und Gestaltung der Lernmedien). [38, S. 348-351] Das Training kann abseits (z.B. virtuell oder in separaten Trainingsbereichen) oder in der laufenden Serienproduktion (unterstützt und überwacht durch zusätzliches bereits geschultes Personal) erfolgen. *Jeske et al.* [38; 40] konnten einen signifikanten Einfluss der Gestaltung und Darstellung von Arbeitsplänen (verbal, textuell, bebildert, animiert) auf den

Verlauf der Lernkurve und insbesondere die Geschwindigkeit der Erstausführung nachweisen, was auch *Lušić et al.* [41] bestätigen. Im Kontext digitaler Assistenzsysteme wurde der mentalen Beanspruchung der Werker bei der Informationsbereitstellung einige Forschungsarbeit gewidmet, worauf im Abschnitt 3.2.2.2 noch näher eingegangen wird.

Rohmert und Kirchner [42] haben bereits 1969 festgestellt, dass der Lernfortschritt auch stark von der Art der Bewegung und ihrer Komplexität abhängt und den in **Abbildung 13** illustrierten Verlauf der Lernkurven beschrieben. Bei einfachen Aufgaben die geringe Präzision erfordern, wie dem Hinlangen zu einem Objekt oder das Verbringen eines Objekts, lässt sich durch Übung kaum eine Leistungssteigerung erreichen. Auch die letztlich erreichbare Leistung schwankt nur geringfügig zwischen verschiedenen Monteuren. Komplexere Tätigkeiten wie das Greifen eines Objekts oder insbesondere das Montieren bzw. Fügen weisen hingegen eine steile Lernkurve mit signifikanter Leistungssteigerung auf. Auch die für individuelle Personen erreichbare Leistungsfähigkeit ist bei diesen Tätigkeitsarten differenzierter.

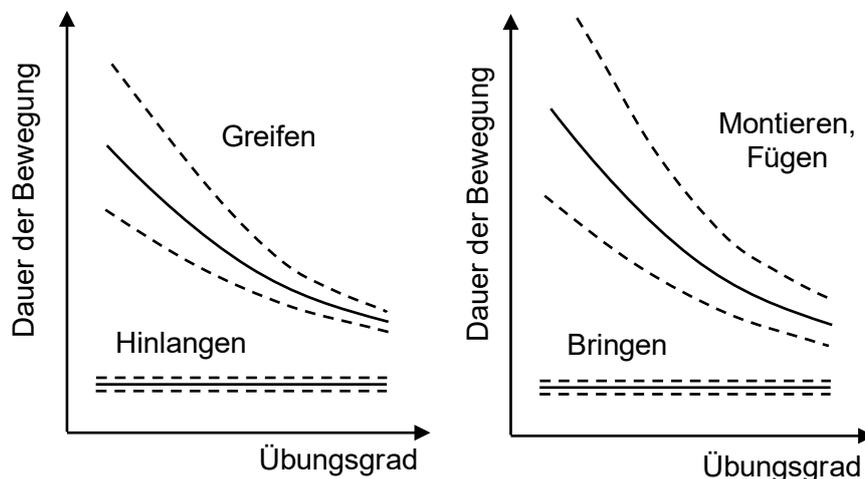


Abbildung 13: Lerneffekte bei verschiedenen sensumotorischen Tätigkeiten (i.A.a [42])

Um die Vorgaben für die Ausführungsdauer bzw. die Bezugsleistung im Rahmen der Arbeitsplanung zu bestimmen, haben sich Systeme vorbestimmter Zeiten wie *Work Factor* (WF) oder *Methods-Time-Measurement* (MTM) etabliert. Bei diesen, auf Tabellenwerken basierenden Methoden, wird die Montagetätigkeit in einzelne Bewegungen zerlegt für die aus den Tabellen Vorgabezeiten entnommen und dann zu einer Gesamtvorgabezeit addiert werden können.

Ein modernes Fahrzeug besteht aus bis zu 10.000 Einzelteilen [7, S. 23]. Aufgrund der Strategie den Kunden individualisierbare Produkte anzubieten sind dabei insbesondere bei hochpreisigen Fahrzeugen vielfältigste Konfigurationen und verschiedenste Farb- und Dekorkombinationen möglich, kaum ein Fahrzeug gleicht dem anderen. Im Hinblick auf diese Varianz, kann auch eine kognitive Überforderung der Mitarbeiter die Leistungsfähigkeit des Montagesystems beeinträchtigen. So konnten *Johansson und Mattsson* [43] zeigen, dass eine hohe Varianz, insbesondere in Kombination mit unzureichender Arbeitsinformation, zu Stress bei den Werkern und niedrigerer Produktqualität führt. Auch einer Studie von *Wagner et al.* [44] zufolge stellt Informationsmangel einen wesentlichen Faktor bei Störungen in der Endmontage dar. Neben einer umfassenden Qualifizierung und kontinuierlichem Training der Werker ist

daher auch die bedarfsgerechte Bereitstellung von Information von entscheidender Bedeutung für ein effizientes Montagesystem. Die Qualifizierung kann lediglich ein grundsätzliches Verständnis und das Training die nötige Routine für die Bearbeitung innerhalb der vorgegebenen Taktzeit vermitteln. Bei bis zu 500 Einheiten je Schicht muss die Information welche Varianten und Komponenten in dem jeweiligen Fahrzeug zu verbauen sind hingegen direkt im Prozess verfügbar gemacht werden. *Kropik* [7, S. 23] zählt die Aufbereitung und zielgerichtete Bereitstellung von Montageinformation daher zu den Hauptaufgaben eines Produktionsteilsystems.

Der überwiegende Teil der Qualitätsprobleme in der Produktion wird in der Montage verursacht [45, S. 493]. Zu den häufigsten menschlichen Fehlern zählen vergessene Tätigkeiten (wie beispielsweise nicht gesteckte elektrische Verbindung, nicht angezogene Schrauben, nicht gereinigte Dichtfläche), fehlerhaftes Fügen oder Nichteinhaltung von Prozessparametern und -vorschriften (z.B. falsches Drehmoment, Steckverbindung nicht korrekt verrastet) sowie die Verwendung falscher Bauteile. Letzteres stellt aufgrund der Nutzung ähnlicher Bauteile bei unterschiedlichen Modellen insbesondere bei MMALs eine Gefahr dar. Die Ursachen menschlicher Fehler sind vielfältig. Mangelnde Erfahrung, Überlastung und Stress, Unachtsamkeit, Abweichung von Arbeitsabläufen oder fehlende Standards aber auch mangelnde Motivation oder sogar Vorsatz können eine Rolle spielen. Auch treten Defizite, die in vorgelagerten Bereichen wie dem Karosserierohbau verursacht, jedoch nicht entdeckt werden, oftmals in der Montage zu Tage und sorgen dort für Probleme.

Sofern Qualitätsdefizite vor der Auslieferung erkannt und behandelt werden, klassifiziert man die Kosten (z.B. durch Ausschuss, Nacharbeit, Stillstände) als interne Fehlerkosten, nach der Auslieferung (Gewährleistungs- und Garantiekosten, Reparatur, Rücknahme, Reputationsverlust, etc.) als externe. Weiterhin entstehen in der Montage Kosten für Maßnahmen zur Fehlervermeidung (Präventionskosten) sowie für die Qualitätskontrolle. Dabei gilt der Grundsatz, dass die Kosten exponentiell steigen, je später die Probleme entdeckt werden [45]. Daher ist neben der Mitarbeiterqualifizierung bereits während des Produktdesigns auf eine montagegerechte Gestaltung zu achten, um Montagefehler wie eine falsche Ausrichtung durch entsprechende konstruktive Maßnahmen (z.B. Codierung elektrischer Steckverbindungen) zu vermeiden. Dieses *Poka Yoke* (japanisch für „unglückliche Fehler vermeiden“) genannte Prinzip hat sich als Element des Toyota-Produktionssystems in der Branche etabliert. Zudem muss im Rahmen der Montageplanung eine systematische Risikobewertung durchgeführt werden, um fehlerträchtige oder besonders kritische Montageprozesse zu identifizieren und entsprechende präventive oder, sofern dies nicht möglich ist, reaktive Qualitätsmaßnahmen festzulegen. Reaktive Maßnahmen reichen von einfachen Sichtkontrollen oder mechanischen Prüfungen über automatische Kontrolleinrichtungen (z.B. *Computer-Vision* Systeme) bis zu Betriebsmitteln, die Prozessparameter selbstständig überwachen (z.B. Schraubanlagen).

2.2 Montageplanung und Prototypenproduktion in der Serienentwicklung

Nachdem im vorherigen Abschnitt die Grundlagen der automobilen Serienproduktion und insbesondere der Fahrzeugmontage dargestellt wurden, folgt nun eine Betrachtung der vorgelagerten Phase der Serienentwicklung. Im Fokus stehen dabei die Montageplanung und die

Prototypenproduktion sowie ihre Schnittstellen, im Speziellen die Zusammenarbeit bei der Absicherung der Montageprozesse für den Serienanlauf.

2.2.1 Montageplanung und Arbeitsvorbereitung

Die Fabrikplanung lässt sich in die vier Bereiche der Strategie-, Struktur-, System- und Ausführungsplanung unterteilen. Die Strategieplanung, deren Aufgabe in der Erreichung der langfristigen Unternehmensziele und der Sicherung der Konkurrenzfähigkeit liegt, umfasst Themen wie die Auswahl von Produktionsstandorten und die Gestaltung der grundlegenden Struktur des Produktionsnetzwerks. Ziel der Strukturplanung ist die funktionsgerechte Verknüpfung aller Elemente eines Fabriksystems, woraus das Layout der Fabrik resultiert (Flächenbedarfe, Anordnung der Gewerke, Materialflüsse und Transportwege etc.). In der Systemplanung werden die Materialflüsse detailliert, Fertigungs-, Montage- und Logistik-systeme (Lager, Transportsysteme) entworfen, Gebäude und technische Infrastruktur geplant sowie Schnittstellen zwischen den Gewerken definiert. Die für die vorliegende Arbeit primär relevanten Tätigkeiten der Montagesystemplanung sind diesem Bereich zuzurechnen. Die Aufgabe der Ausführungsplanung besteht schließlich in der detaillierten Ausplanung (Feinlayouts, Ausstattung / Betriebsmittel), der Ausschreibung bzw. Beschaffung sowie der Ausführungsüberwachung. [46] Für die überwiegende Anzahl der Fahrzeugprojekte werden jedoch keine neuen Werke errichtet, stattdessen lösen sie auslaufende Modelle ab oder werden zusätzlich auf einer bestehenden MMAL gefertigt. Man spricht in diesen Fällen von einer Integration in das existierende Produktionssystem. Dennoch sind, insbesondere bei größeren technologischen Umbrüchen wie der aktuell laufenden Umstellung der Antriebsarten, häufig umfangreiche Änderungen, Modernisierungen oder Erweiterungen an den Fabriken nötig und die oben genannten Planungsfelder müssen entsprechend involviert werden.

Als Bindeglied zwischen Produktentwicklung und Produktion umfasst die Montageplanung die Spezifikation der Montageprozesse sowie die Planung erforderlicher Produktionsmittel und Ressourcen. Das übliche Vorgehen lässt sich wie in **Abbildung 14** dargestellt in eine Grob- und Feinplanung unterteilen, wobei der Übergang fließend stattfindet und auch Iterationen vorkommen. Sie beginnt, sobald das Produktkonzept eine gewisse Reife erreicht hat und ein Grundgerüst der Produktstruktur zur Verfügung steht. Die Konstruktionsdaten, die von der Entwicklung an die Planung übergeben werden, bilden den Ausgangspunkt bei der Definition der einzelnen Arbeitsschritte, der Bestimmung von Montagezeiten sowie der Ableitung einer Montagereihenfolge.

Nach der grundlegenden Konzeption des Arbeitssystems und der Bestimmung der Kapazitäten (bei der Integration in der Regel bereits durch das bestehende System festgelegt) wird das Produkt zunächst strukturiert und eine Zuordnung der Fahrzeugumfänge zu den Planungsteams erstellt. Aufgrund der erforderlichen engen Zusammenarbeit zwischen Konstrukteuren, Entwicklern und Planern, ist die Montageplanung wie die Entwicklung häufig in Fachteams strukturiert, die jeweils einen bestimmten Fahrzeugumfang verantworten (beispielsweise Fahrwerk, Motorraum oder Mittelkonsole). In den Teams werden anschließend auf Basis der Produktstruktur die einzelnen Arbeitsabläufe beschrieben, Ausführungszeiten abgeschätzt und Restriktionen identifiziert, die aus der Produktstruktur oder den bestehenden Werkstrukturen resultieren (dokumentiert im sogenannten Montagevorranggraph). Der Fokus liegt dabei

zunächst auf den konstruktiv bedingten Arbeitsinhalten (eHPV, vgl. Abschnitt 2.1.4), für Prozess- und Mehrzeiten werden pauschal gewisse Anteile der Taktzeit vorgehalten.

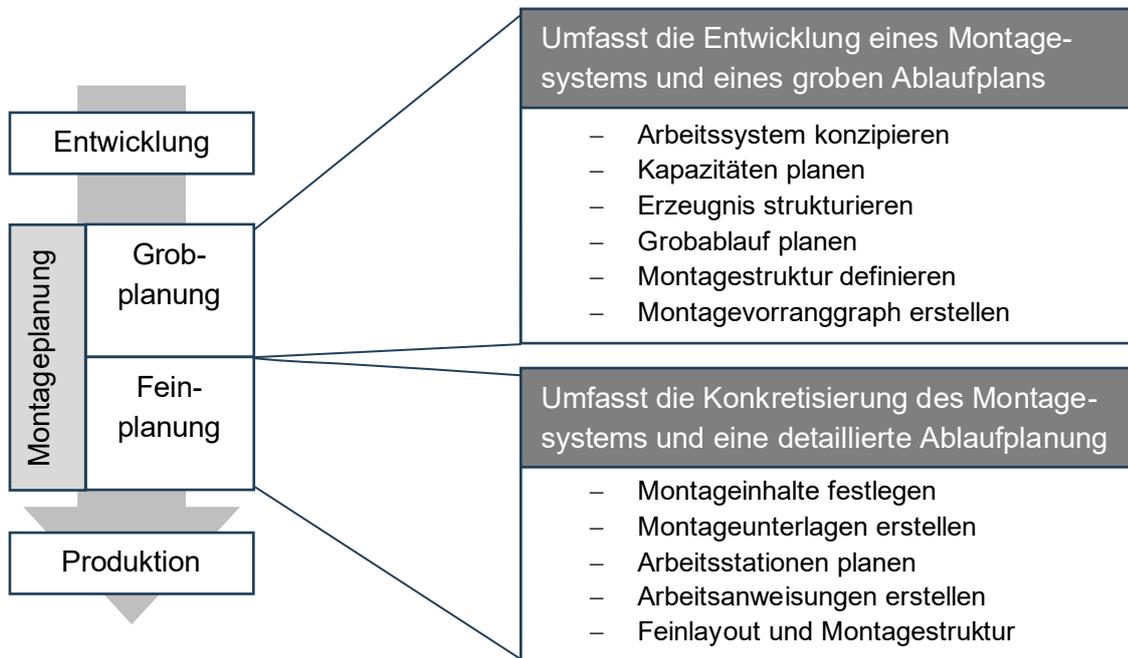


Abbildung 14: Phasen und Kernaufgaben der Montageplanung [47, S. 22]

Ein erstes Fertigungskonzept, das eine Kostenabschätzung ermöglicht und ein grober Ablaufplan, der alle erforderlichen Montageschritte umfasst und die wesentlichen Restriktionen berücksichtigt stellen das Ergebnis dieser Planungsphase dar. Maßnahmen zur Beeinflussung der Produktgestaltung im Sinne der Montage sind aufgrund der mit fortschreitender Entwicklung steigenden Änderungskosten möglichst frühzeitig einzusteuern, auch komplexere Anlagen und erforderliche Sonderbetriebsmittel sollten wegen der langen Laufzeiten bei Entwicklung, Beschaffung und Validierung möglichst frühzeitig identifiziert werden.

Während der Feinplanung erfolgt eine detailliertere Analyse der Prozesszeiten sowie eine Überprüfung der Schätzzeiten, um belastbare Planzeiten für die Abtaktung (auch *line balancing* genannt) zu generieren. Um stabile Abläufe für die Serienproduktion sicherzustellen, werden im Rahmen der Feinplanung auch umfangreiche Risikoanalysen, Prozessbewertungs- und Absicherungsmaßnahmen durchgeführt, auf die im Kapitel 2.2.4 näher eingegangen wird. Wurden den einzelnen Montagearbeitsplätzen durch die Abtaktung die auszuführenden Tätigkeiten zugeteilt, so erfolgt die Ausplanung der Materialbereitstellung, die detaillierte Personalbedarfsplanung sowie die Erstellung der Arbeitsanweisungen, die zur Instruktion und Qualifizierung der Montagemitarbeiter dienen.

Aufgrund der andauernden Produktentwicklung und den zahlreichen konstruktiven Änderungen bis zum Erreichen des Serienstandes, ist auch die Montageplanung zu kontinuierlichen Anpassungen gezwungen. [47, S. 24] Um dabei den Überblick zu behalten, stehen dem Montageplaner bei seiner Arbeit IT-Systeme zu Verfügung, die ihm den aktuellen Stand der Produktentwicklung darstellen, ihn bei der Beschreibung, Bewertung und Abtaktung der Montageschritte unterstützen und die Planungsergebnisse dokumentieren. Da mit großen Daten-

mengen, häufig geringer Datenqualität sowie gewissen Ungenauigkeiten und Unsicherheiten (z.B. Nachfrageprognosen) gearbeitet wird, ist die Montageplanung naturgemäß mit einem gewissen Risiko behaftet. Aufgrund der Vielzahl an Variablen und ihren Wechselwirkungen ist eine optimale Auslegung (sofern diese in der Praxis überhaupt jemals erreichbar ist) bis zur Übergabe an das Serienwerk nicht zu erwarten und eine Optimierung während der Vorserienproduktion und über den SoP hinaus nicht ungewöhnlich. [48, S. 3]

Da die Produktionskapazitäten und bei MMALs der Modellmix laufend an die Nachfrage angepasst und im Rahmen des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP) stetig Optimierungsmaßnahmen umgesetzt werden, ist die Montageplanung auch über die gesamte Serienproduktion hinweg bis zum EoP involviert. Die Integration von weiteren Modellen sowie die Planung von Folgederivaten erfordert Transparenz bezüglich des aktuellen Standes der laufenden Serienproduktion. Zudem ist es im Sinne der Planungseffizienz natürlich insbesondere bei ähnlichen Fahrzeugprojekten (enge Ableitungen wie Limousine und Kombi) zweckmäßig auf den vorhandenen Planungsergebnissen aufzubauen. Daher ist es essentiell, dass der in den Planungssystemen dokumentierte Stand stets aktuell gehalten wird und den realen Abläufen im Werk entspricht.

2.2.2 Serienproduktionsanlauf

Die Phase zwischen abgeschlossener Produktentwicklung und Erreichung der vollen Produktionskapazität wird als Serienanlauf (engl. *ramp-up*) bezeichnet. Ihr Ziel ist die Überführung eines vormals im Prototypenstadium befindlichen Fahrzeugprojekts in eine stabile Serienproduktion. *Schuh et al.* teilen den Serienanlauf wie in **Abbildung 15** dargestellt in die drei Phasen Vorserie, Nullserie und Produktionshochlauf ein. Meist werden Vor- und Nullserien dem Serienanlauf zugerechnet, teilweise wird der Begriff jedoch auch lediglich für den Produktionshochlauf verwendet. Während der Vor- und Nullserie werden Gesamtfahrzeugprototypen in mehreren Phasen mit steigender Stückzahl unter seriennahen Bedingungen auf der Serienlinie oder einer separaten Pilotlinie hergestellt. Die beiden Phasen unterscheiden sich dadurch, dass in der Nullserie alle Bauteile zu 100 % aus Serienwerkzeugen stammen, während dies in der Vorserie noch nicht der Fall ist. Mit der Freigabe der Serienproduktion (zum SoP) beginnt die Hochlaufphase, in der Kundenfahrzeuge mit steigender Stückzahl hergestellt werden. Sie endet mit dem Erreichen einer stabilen Produktion auf dem Niveau der Plankapazität. [8] Für eine detaillierte Beschreibung des Serienanlaufs sei auf [49] verwiesen.

Der Verlauf der Stückzahlen in der Hochlaufphase wird als Anlaufkurve bezeichnet. Da zu Beginn einer Markteinführung das Interesse der Kunden hoch ist und die Nachfrage das Angebot übersteigt, lassen sich in diesem Zeitraum signifikante Gewinne erwirtschaften. In dieser instabilen Phase kommt es jedoch aufgrund mangelhafter Produkt- oder Produktionskonzepte aber auch durch organisatorische Defizite häufig zu unvorhergesehenen Problemen, die Verzögerungen und damit Kosten bzw. entgangene Gewinne nach sich ziehen. Ein signifikanter Teil der Fahrzeugprojekte erreicht die wirtschaftlichen Zielsetzungen dadurch nicht [50–52].

Durch die Steigerung der Stückzahlen nimmt der zeitliche Druck auf das Personal in der Montage zu und es treten Defizite in den Abläufen zu Tage, die in vorherigen Phasen nicht entdeckt wurden oder aufgrund der geringen Stückzahlen bzw. Varianz nicht aufgetreten sind. Aus der

Vielzahl an Gestaltungsmöglichkeiten und ihren Zusammenhängen sowie den zahlreichen involvierten Disziplinen resultiert eine hohe Komplexität bei der Problemlösung, die weitere Verzögerungen verursachen und den Lösungsprozess verlangsamen kann. Als Gegenmaßnahme wird oftmals versucht zusätzliches qualifiziertes Personal einzubinden, was die Kosten steigert und durch erhöhten Koordinationsaufwand wiederum zu Schwierigkeiten führen kann.

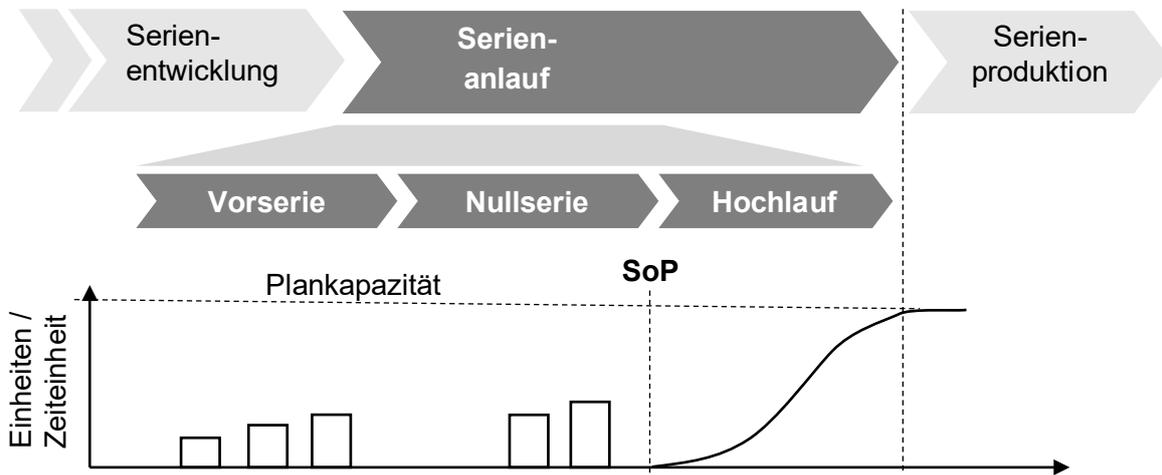


Abbildung 15: Phasen des Serienanlaufs und Entwicklung der Stückzahlen (i.A.a. [8, S. 2; 53, S. 9])

Um den Anlauf möglichst effizient zu gestalten und die Serienwerke zu entlasten, ist es daher aus Sicht der Montage wichtig bereits in der Serienentwicklung durch virtuelle Methoden und die gezielte Nutzung der Prototypenproduktion einen möglichst hohen Reifegrad zu erreichen und das Risiko durch systematische Prozessabsicherung zu minimieren. Dabei darf sich dies nicht verlängernd auf die Serienentwicklung auswirken.

2.2.3 Prototypenmontage in der Serienentwicklung

Physische Prototypen dienen der Überprüfung der Produktentwicklung und der Validierung von Simulationsergebnissen. Zu den Anwendungsbereichen zählen Versuche auf Prüfständen, Crash-Tests sowie Erprobungsfahrten mit vielfältiger Sensorik unter verschiedensten klimatischen Bedingungen. Neben der Prüfung von Grundfunktionen und der Zuverlässigkeit des Produkts stellt auch die Untersuchung der Produktionsfähigkeit eine Zielsetzung dar, dafür werden jedoch in der Regel keine eigenen Prototypen vorgesehen. [54, S. 15-17]

Wenngleich die wachsenden Fähigkeiten virtueller Methoden dazu geführt haben, dass die Gesamtzahl der Hardwareaufbauten deutlich reduziert werden konnte, scheint ein vollständiger Verzicht auch mittel- bis langfristig nicht plausibel. Einige Aspekte können bislang nur unzureichend virtuell evaluiert werden, zudem ist der Aufwand für umfassende Simulationen aufgrund der erforderlichen Datenaufbereitung nach wie vor sehr hoch. Auch aus Gründen der Produkthaftung sind Versuche mit physischen Prototypen derzeit unumgänglich. Berichte aus der Industrie (z.B. [55–57]) zeigen, dass das Ziel bei dem verstärkten Einsatz virtueller Methoden neben der Reduzierung der Prototypen insbesondere in der Steigerung der Reife der ersten physischen Aufbauten liegt.

Sobald ein erster konsistenter, auf geometrische Stimmigkeit und grundsätzliche Herstellbarkeit geprüfter virtueller Fahrzeugprototyp vorliegt, wird mit der Hardwarebedarfsplanung und der Beschaffung von Komponenten für die Prototypenproduktion begonnen. Da Hardwareprototypen sehr kostspielig sind, werden im Rahmen der Bedarfsplanung alle Anforderungen der Entwicklungs- und Planungsabteilungen gesammelt und dann ermittelt, wie diese mit einer minimalen Anzahl von Fahrzeugen abgedeckt werden können. Es ist dabei zu klären, wie viele Fahrzeuge mit welchen Ausstattungsvarianten und welchem Reifegrad für welchen Zweck zu welchem Zeitpunkt benötigt werden und wie durch eine Mehrfachverwendung der Versuchsträger eine maximale Auslastung dieser erreicht werden kann. Daraus resultiert die Programmplanung für die Prototypenphase. Bei neuartigen Fahrzeugkonzepten oder dem ersten Modell einer neuen Modellfamilie kann die Prototypenphase mehrere Monate und einige hundert Prototypenfahrzeuge umfassen. Vor den Gesamtfahrzeugen werden zudem in vielen Fällen auch Teilaufbauten oder umgerüstete Serienfahrzeuge hergestellt. Aufgrund der langen Laufzeiten zwischen der Bestellung der Prototypenteile und dem Beginn der Produktion und der währenddessen kontinuierlich voranschreitenden Produktentwicklung sind die ersten Prototypen zum Zeitpunkt ihrer Fertigstellung bereits veraltet und entsprechen nicht mehr dem aktuellen Konstruktionsstand. [17, S. 10]

Üblicherweise wird das Prototypenprogramm daher in mehrere Chargen mit kürzer werdenden Pausen unterteilt, in denen die Reife der Komponenten sukzessiv gesteigert wird, bis der Stand dem der laufenden Entwicklung entspricht. Um konstruktive Änderungen möglichst zeitnah umsetzen zu können, haben *rapid-prototyping* Verfahren wie die additive Fertigung in den letzten Jahren dabei enorm an Bedeutung gewonnen.

Der Rahmen, in dem die Versuchsfahrzeuge während der Serienentwicklung produziert werden, unterscheidet sich stark von der späteren Produktion im Serienwerk (vgl. [58, S. 70]) Die Prototypenproduktion findet in der Regel in von der Serienproduktion abgetrennten Bereichen, beispielsweise einem eigenen Pilotwerk oder einem Forschungszentrum statt. Die Stückzahlen und auch der Zeitdruck bei der Montage sind deutlich geringer. Dabei liegt der Automatisierungsgrad noch einmal deutlich unter dem der Serienmontage. Die breite Palette an Modellen, vom Kleinwagen bis zum Oberklassefahrzeug, die in der Prototypenmontage hergestellt werden erfordert maximale Flexibilität. Anstelle einer Fließmontage mit hoher Arbeitsteilung ist hier eher eine lose gekoppelte Reihenmontage mit unregelmäßigen Taktzeiten im Bereich von Stunden anzutreffen. Arbeiten in ähnlichen Montageräumen werden dabei zusammengefasst, da anstelle einer ausgedehnten Fördertechnik rollbare Transportgestelle sowie stationäre Gehänge oder Hebebühnen zum Einsatz kommen. Der Aufbau erfolgt durch eigenes, speziell geschultes Personal des Prototypenwerks oder durch erfahrene Monteure aus dem Werk, in dem die spätere Serienproduktion erfolgt. Da die Stückzahlen im Prototypenbau den Entwicklungszyklen folgen, unterliegen sie deutlichen Schwankungen im Jahresverlauf. Der Ansatz Personal aus dem Serienwerk abzustellen, ermöglicht es die Kapazität flexibel anzupassen und fördert zudem den Wissenstransfer und die Kommunikation in die Serie.

Aufgrund der Neuheit und Komplexität der Produkte, den laufend einfließenden Änderungen sowie den Problemen die aus niedriger Reife von Produkt und Prozessen resultieren, herrscht in der Prototypenmontage ein hoher Bedarf an aktuellen Informationen zu den aktuellen Entwicklungs- und Planungsständen. Da diese Informationen jedoch in der Regel nicht zentral

und strukturiert, sondern auf verschiedene Domänen und Experten verteilt vorliegen, ist der Kommunikationsaufwand entsprechend hoch.

2.2.4 Absicherung von Montageprozessen

Die Validierung als kontinuierlicher Abgleich des Entwicklungsfortschritts mit der Zielsetzung stellt eine zentrale Aktivität im Entwicklungsprozess dar. *Albers et al.* bezeichnen sie sogar als die aufwendigste und herausforderndste Aktivität im gesamten Produktentstehungsprozess [18, S. 541]. Während man im akademischen Umfeld Verifikation und Validierung unterscheidet, wird in der industriellen Praxis häufig der Begriff Absicherung subsummierend für alle Test- und Erprobungsaktivitäten genutzt. Neben der Absicherung der Produkteigenschaften müssen auch die geplanten Montageprozesse im Hinblick auf die Serienproduktion umfassend geprüft, bewertet und optimiert werden. *Wack et al.* [57] unterscheiden in diesem Kontext die folgenden vier Bereiche:

- **Produktionsbezogene Produktabsicherung:** Absicherung von Produktaspekten aus Sicht der Produktion, z.B. geometrische Konsistenz, Montagevorrangbeziehungen, Ein- und Ausbaupfade, Fügekonzepte und Tauglichkeit von Verbindungselementen.
- **Produktbezogene Prozessabsicherung:** Grundlegende Absicherung aller wertschöpfenden Prozesse (konstruktiv bedingter Arbeitsinhalt, eHPV) hinsichtlich produktbezogener Aspekte. Dazu zählen beispielsweise die Zugänglichkeit von Montageräumen und Verbindungselementen (ggf. mit Werkzeugen), die Betrachtung von Toleranzeinflüssen und die Tauglichkeit von Prozessparametern sowie die Ermittlung / Überprüfung der Ausführungszeiten für die wertschöpfenden Tätigkeiten.
- **Produktionsbezogene Prozessabsicherung:** Absicherung aller Prozesse hinsichtlich produktbezogener Aspekte wie Ergonomie (Einsehbarkeit der Montagestellen, Montagekräfte, Körperhaltung, etc.), Fehlhandlungssicherheit und Beschädigungsrisiko sowie Zeitermittlung für die nicht unmittelbar wertschöpfenden Tätigkeiten (z.B. Wege- und Handlings-Zeiten).
- **Ressourcenabsicherung:** Absicherung aller Ressourcen, die für die Montage benötigt werden: Material- und Informationsbereitstellung, Betriebsmittel wie Anlagen, Werkzeuge, Handlingsgeräte und Sonderbetriebsmittel.

Aufgrund der mit dem Fortschritt der Entwicklung steigenden Änderungskosten ist es zweckmäßig, die produktionsbezogene Produktabsicherung unter Verwendung digitaler Modelle bereits sehr früh in der Serienentwicklung zu starten [58, S. 12]. Die Prüfung von geometrischer Konsistenz, Ein- und Ausbaupfaden sowie auch teilweise die der Zugänglichkeit mit Werkzeugen und Kompatibilität mit Anlagen lässt sich bereits heute umfassend und teilweise automatisiert mit virtuellen Methoden bewerkstelligen. Für das Fahrzeug liegen ebenso wie für größere Anlagen und Standardwerkzeuge 3D-Modelle der Geometrie und teilweise auch der Kinematik vor. Auch ein großer Teil der produktbezogenen Montageprozessplanung (eHPV) findet bereits vor den ersten physischen Aufbauten statt. Jedoch lassen sich in der virtuellen Welt einige Aspekte der realen Montage nur unzureichend abbilden, beispielsweise das Verhalten

flexibler Bauteile wie Kabel, Schläuche oder Matten. Simulationen komplexer Abläufe (wie z.B. dem Fädeln von Leitungen) oder umfangreicher Szenarien sind aufgrund des hohen Vorbereitungsaufwands nur sehr begrenzt möglich [57, S. 50-51; 58, S. 48].

In Bezug auf die produktionsbezogene Prozessabsicherung und die Ressourcenabsicherung stellt der Prototypenbau daher für die Montageplanung eine wichtige Gelegenheit dar, um die geplanten Abläufe und Betriebsmittel in der realen Welt zu evaluieren. Untersuchungen können während der regulären Prototypenmontage oder in Form gesonderter Workshops durchgeführt werden. Bei einem typischen Produktionsvorbereitungsworkshop wird ein Prototyp über mehrere Wochen hinweg Schritt für Schritt aufgebaut und der Vorgang von einem interdisziplinären Team beobachtet und bewertet [16, S. 39; 57, S. 47]. Derartige Workshops werden mit variierenden Schwerpunkten mehrmals bis zum SoP durchgeführt. Teilweise verfügen Unternehmen für die Absicherung über eigene Montagebereiche oder Pilotwerke, die eine detaillierte Abbildung der Serienumgebung ermöglichen. Dies erlaubt eine präzise Planung und Optimierung, beispielsweise der Bereitstellung von Material und Betriebsmitteln, ohne in der laufenden Produktion vor Ort sein zu müssen. Auch wird zunehmend versucht die Bewertung durch den Einsatz von Sensorik zu automatisieren und zu objektivieren.

Bei der Prozessabsicherung kann zwischen Problemen und Defiziten unterschieden werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe wie folgt verstanden: Probleme sind Unzulänglichkeiten im Produktkonzept, in Prozessen, in Komponenten oder Betriebsmitteln, die bereits im Prototypenbau zu Schwierigkeiten bei der Montage führen und daher in der Regel ohne gezielte Suche auffallen. Unter Defiziten werden hingegen weniger offensichtliche Aspekte und Eigenschaften verstanden, die im Serienentwicklungs- und Vorserienumfeld keine unmittelbaren oder nur geringfügige Auswirkungen haben. Sie führen jedoch erfahrungsgemäß im Serienumfeld zu Schwierigkeiten, sobald Stückzahlen und Zeitdruck steigen. Beispielsweise fallen Aspekte der Fehlhandlungssicherheit häufig in diese Kategorie. Um derartige Schwächen zu identifizieren, das Risiko bzw. die potenziellen Auswirkungen zu bewerten und ggf. möglichst frühzeitig Abhilfe zu schaffen, ist eine gezielte, systematische Absicherung erforderlich. *Hesse und Weber* [14] unterscheiden in ihrer Analyse zwischen prozess- und produktbezogenen Problemen. Zu ersteren zählen sie Unzulänglichkeiten in Produktionsprozessen, die durch eine Anpassung dieser behoben werden. Als produktbezogene Probleme definieren sie hingegen alle Umstände, die eine Anpassung des Produktkonzepts erfordern.

Diese, auf die Problemlösung fokussierte Sichtweise, soll für diese Arbeit nicht uneingeschränkt übernommen werden. Eine Klassifizierung von in der Praxis zu beobachtenden Problemen ist damit weder eindeutig noch vollständig möglich, zudem wird der Problemursache ungenügend Rechnung getragen. Die zuverlässige Identifikation der Ursache ist oftmals nicht ohne detaillierte Analyse möglich. Es lassen sich sowohl für Defizite in der montagegerechten Produktgestaltung prozessuale Lösungen finden, wie auch Problemen mit Produktionsprozessen durch eine Anpassung am Produkt abgeholfen werden kann. Unhandliche und empfindliche Bauteile, wie große Dekorleisten oder Displays stellen ein Beispiel für einen derartigen unklaren Fall dar. Produktionsschwierigkeiten im Zusammenhang mit solchen Komponenten können sowohl durch Anpassung des Produkts (alternatives Design, weniger empfindliche Materialien) wie auch prozessual (z.B. Montage durch zwei Mitarbeiter, zusätzliche Hilfsmittel oder Produktschutz) gelöst werden. Eine Zuweisung der Verantwortung für Änderungskosten,

personellen Mehraufwand, Nacharbeit oder Ausschuss ist jedoch in diesem Fall schwierig. Ungeachtet der Ursache und der letztendlich umgesetzten Lösung müssen alle in der Prototypen- und Vorserienproduktion, der virtuellen sowie der physischen Absicherung identifizierten Probleme und Defizite dokumentiert und einem Problemlösungsprozess zugeführt werden.

2.3 Digitalisierung in der Montage – „Industrie 4.0“

Für die zunehmende informationstechnische Vernetzung von Maschinen, Menschen, Objekten und Diensten im Bereich der industriellen Wertschöpfung wurde der Begriff „Industrie 4.0“ geprägt [59]. Diesem Trend wird das Potenzial zugesprochen, nach der Dampf- bzw. Kraftmaschine (etwa 1750), der Massenproduktion ermöglicht durch elektrische Energie (ab ca. 1870) und der Automatisierung der Produktion durch Elektronik und Informationstechnik (um 1960) die vierte industrielle Revolution auszulösen [60, S. 6]. Getrieben durch die exponentiell steigende Rechenleistung integrierter Schaltungen (*Moore's law*), die Aussicht auf Profite auf Basis neuer, durch die Vernetzung ermöglichter Geschäftsmodelle sowie die Hoffnung der explodierenden Komplexität in der Produktion individualisierter Produkte durch Dezentralisierung und Autonomie begegnen zu können, wird am „Internet der Dinge“ gearbeitet. Cyber-Physische Systeme (CPS), die ihre Umwelt mittels Sensorik wahrnehmen und durch Aktorik beeinflussen können, über lokale „Intelligenz“ verfügen und durch eine Anbindung an das Internet mit anderen Systemen und Diensten kommunizieren können, bilden den zentralen Baustein in der Vision der Smarten Fabrik. [60, S. 18]

Im Bereich der Montage lassen sich auf der Ebene des Shopfloors zwei grundsätzliche Ausprägungen cyber-physischer Systeme identifizieren. Die erste bilden Systeme, die den Menschen physisch unterstützen, mit ihm zusammenarbeiten indem sie ihm monotone, anstrengende oder gefährliche Aufgaben abnehmen oder ihn in bestimmten Bereichen durch innovative Automatisierungskonzepte ersetzen. Robotik aus dem Forschungsbereich der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) zählt zu diesem Bereich. Da der Mensch trotz zunehmender Automatisierung nach wie vor eine zentrale Rolle in der Montage spielt, hat sich eine zweite Art von Systemen etabliert die sich auf kognitive Unterstützung des Werkers konzentriert. Hierzu zählen Informations- und Assistenzsysteme. Innovationen aus dem Bereich der Logistik, wie beispielsweise autonome Transportvehikel bieten zudem neue Möglichkeiten bei der Gestaltung des Montagesystems, bis hin zur Auflösung der starren Verkettung einer Fließfertigung mit konventioneller Fördertechnik. Des Weiteren wird die übergelagerte Kontrollebene zunehmend durch Sensorik angereichert, die zusammen mit den Daten der CPS eine echtzeitnahe Überwachung und Steuerung der Montage in hoher Granularität ermöglicht. Die Lokalisierung von Fahrzeugen und Betriebsmitteln mittels *Radio-Frequency Identification* (RFID) oder *Ultra-Wideband* (UWB) stellt ein entsprechendes Beispiel dar.

Für die vorliegende Arbeit sind aus diesem Themenkomplex insbesondere Werkerassistenzsysteme für die manuelle Montage von Bedeutung. Einfache Informationssysteme, die lediglich in der Lage sind unidirektional Information wie beispielsweise die zu montierende Produktvariante zum Werker zu transportieren, eignen sich für eine Serienproduktion mit kurzen Taktzeiten, qualifiziertem Personal sowie einer überschaubaren Variantenzahl und sind in diesem Bereich seit Jahren etabliert. Sie haben in vielen Bereichen den papierbasierten Fahrzeug-

auftrag als Informationsträger abgelöst und basieren auf Text, einfachen graphischen Darstellungen oder Symbolen. Technisch fortgeschrittenere Konzepte ermöglichen hingegen eine kontextbezogene Informationsbereitstellung auf Basis einer sensorischen Prozessüberwachung, weitergehende Funktionen wie die Ansteuerung von Betriebsmitteln und eine Interaktion zwischen Werker und System. Dadurch eignen sie sich auch für Szenarien mit neuartigen oder hochgradig individuellen Produkten, einer unüberschaubareren Variantenzahl, unvorhersehbaren Ereignissen oder unerfahrenen Mitarbeitern. In der Smarten Fabrik können sie dazu beitragen die Flexibilität zu steigern, die steigende Komplexität zu beherrschen und dem Menschen einen Arbeitsplatz zu bieten, der seine individuellen Eigenschaften, Fähigkeiten und Stärken stärker berücksichtigt. Getrieben durch technische Innovationen, die neue Möglichkeiten eröffnen und soziale Aspekte der industriellen Produktion hat dieser Themenbereich, wie in Abschnitt 3.2 dargelegt wird, in den letzten Jahren einige Aufmerksamkeit in der anwendungsorientierten Forschung erhalten.

Neben den zahlreichen Demonstrationsanlagen aus der Forschung sind entsprechende Lösungen zunehmend in Form kommerzieller Produkte erhältlich. Die Systeme unterscheiden sich primär durch die Art der Informationsbereitstellung (z.B. als Text, Bild oder Grafik per Monitor, als Projektion mittels Laser), das Bedienkonzept sowie die integrierbare Peripherie. In **Tabelle 6** sind einige, speziell für die manuelle Montage konzipierte Produkte aufgelistet, die im Rahmen der Recherche zur vorliegenden Arbeit identifiziert werden konnten.

Des Weiteren bieten einige Systemintegratoren kundenspezifische Lösungen. Die genannten Lösungen richten sich primär an manuelle Montagearbeitsplätze in der Serienproduktion. Die Erstellung und Pflege der Arbeitspläne und Montageanweisungen erfolgt in der Regel mittels einer dedizierten, systemspezifischen Software.

| Produkt | Anbieter | Beschreibung |
|----------------|---------------------------------------|--|
| ActiveAssist | Bosch Rexroth AG | Modulares System, Software- und Hardware-Komponenten |
| DESC | DE software & control GmbH | Software mit Integrationsmöglichkeit für Hardwarekomponenten |
| SK Assembly | Optimum datamanagement solutions GmbH | Assistenzsystem mit Fokus auf visuelle Prozesskontrolle |
| flexAssistant | SOMA GmbH | Software mit Integrationsmöglichkeit für Hardwarekomponenten |
| Der Assistent | ulixes Robotersysteme GmbH | Integrierte Lösung mit Fokus auf Projektion der Arbeitsanweisungen |
| ELAM Assistent | Armbruster Engineering GmbH & Co. KG | Modulare Software-Plattform |

Tabelle 6: Beispiele für kommerziell verfügbare Werkerassistenzsysteme (Stand 2021)

3 Praxisdefizit, Stand der Wissenschaft und Forschungsbedarf

Im folgenden Kapitel wird der Forschungsbedarf im skizzierten Themenbereich analysiert und die Zielsetzung der Arbeit durch konkrete Forschungsfragen geschärft. Zunächst werden dazu Defizite und Optimierungspotenziale in der Serienentwicklung, insbesondere der Prototypenmontage und Prozessabsicherung in der industriellen Praxis untersucht.

Im ersten Schritt werden auf Basis der Fachliteratur potenzielle Problemfelder identifiziert und Problemhypothesen formuliert. Den zweiten Schritt bildet die Überprüfung der abgeleiteten Hypothesen mittels einer Fallstudie in einem Automobilunternehmen. Anschließend wird der Stand der Wissenschaft mit einer strukturierten Literaturrecherche analysiert, um einen Überblick über bestehende Ansätze und angrenzende Forschung zu schaffen. Abschließend wird daraus der Forschungsbedarf abgeleitet und die Zielsetzung konkretisiert.

3.1 Herausforderungen und Potenziale bei der Prozessabsicherung in der industriellen Praxis

Wie im Abschnitt 1.1 beschrieben, stellt der Produktionsanlauf neuer Modelle stets eine Herausforderung für das Produktionssystem dar, wobei ein Großteil der in dieser Phase auftretenden Probleme auf vorgelagerte Phasen zurückzuführen ist. Die resultierenden Kosten und Verzögerungen stehen der wirtschaftlich-strategischen Zielsetzung einer verkürzten *time-to-market* und der Reduzierung der Entwicklungskosten entgegen. Probleme hinsichtlich der Herstellbarkeit des neuen Produkts sollten durch die Absicherung im Rahmen der Serienentwicklung möglichst frühzeitig entdeckt und behoben werden. Die Prototypen- und Vorserienmontage nimmt, bei der Evaluierung neuer Produkte aus Produktionssicht und der frühzeitigen Erkennung von Defiziten hinsichtlich der Herstellbarkeit, eine zentrale Rolle ein. Da die Produktionsanläufe vielfach hinter den Erwartungen zurückbleiben [vgl. 8; 61] und Unternehmen der Automobilindustrie vergleichsweise lange Entwicklungszyklen aufweisen, lässt sich annehmen, dass in der Serienentwicklung und auch bei der Absicherung der Montageprozesse Optimierungspotenzial besteht. Dies soll im Folgenden untersucht werden.

3.1.1 Erkenntnisse und Hypothesen aus der Literatur

In der Literatur hat insbesondere die Phase des Serienproduktionsanlaufs in den letzten Jahren einige Aufmerksamkeit erfahren, in deutlich geringerem Umfang werden Ansätze zur vorausgehenden Validierung von Produktionskonzepten diskutiert. Der Prototypenbau und seine Rolle bei der Absicherung der Herstellbarkeit finden hingegen kaum Erwähnung. Es ist jedoch davon auszugehen, dass einige der für den Anlauf als problematisch identifizierten Zusammenhänge in ähnlicher Weise auch in den vorgelagerten Phasen der Serienentwicklung Schwierigkeiten bereiten und daher auch dort Optimierungsmöglichkeiten bieten.

Ein Mangel an standardisierten und systematischen Methoden und Vorgehensweisen bei der Absicherung und dem anschließenden Hochlauf des Montagesystems wird in der Literatur häufig angeführt. *Albers et al.* stellen fest, dass die Validierung bislang weder umfassend und durchgängig formalisiert ist, noch methodisch stringent erfolgt. Vielmehr basiert sie auf der Erfahrung und Kompetenz einzelner Entwickler und Ingenieure und erfolgt disziplinen-, aufgaben- und produktspezifisch [18]. Laut *Doltsinis et al.* ist der aufwändige Prozess der Planung und Inbetriebnahme von Produktionssystemen bislang unzureichend verstanden und erfolgt mehr erfahrungsgesteuert nach dem Versuchs-Irrtums-Prinzip als systematisch-strategisch [61]. *Terwiesch und Bohn* sehen Defizite beim Wissensmanagement und zu wenig Absicherung unter seriennahen Bedingungen als wesentliche Gründe für fehlgeschlagene Anläufe. Sie argumentieren, dass der Lernprozess in vielen Unternehmen heute mehr zufällig als systematisch abläuft, fordern gezieltes Lernen durch systematische Versuche und warnen davor eine schnelle Steigerung der Stückzahlen zu Lasten einer umfassenden Absicherung zu priorisieren. [62]

Utting et al. stellen mit allgemeinerem Blick auf die Evaluation technischer Systeme fest, dass die Absicherungsplanung häufig unstrukturiert und nicht nachvollziehbar erfolgt und unzureichend dokumentiert wird [63]. Zur Steuerung des gesamten Entwicklungsprozesses und des Anlaufs wird häufig ein sogenanntes *Stage-Gate* Modell angewendet, das vorsieht zu bestimmten Meilensteinen eine gewisse Reife zu erreichen, bevor die nächste Phase begonnen wird. In der Praxis ist es jedoch häufig schwierig die Reife objektiv zu beurteilen und ihre Entwicklung zu messen, es fehlen entsprechende Methoden, Daten und Kennzahlen [25]. *Dombrowski et al.* sprechen in diesem Zusammenhang vom *Ramp-up data gap* und schlagen den Einsatz cyber-physischer Systeme in der Vorserie und dem Hochlauf vor, um in diesen Phasen systematisch Daten zu erheben [5, S. 1020]. *Müller* bemängelt in seiner Analyse der produktionsbezogenen Produktabsicherung eine unzureichende Integration der domänenspezifischen Informationssysteme und das Fehlen einer einheitlichen und synchronisierten Datenbasis im Entwicklungs-, Planungs- und Absicherungsprozess [58, S. 124-125]. Hinsichtlich der Problemlösung im Rahmen der Entwicklung komplexer physischer Produkte zeigt eine Studie von *Burggräf und Weisser* [64] Optimierungspotenzial bei deutschen Industrieunternehmen, insbesondere im Bereich des Wissensmanagements.

Zusammenfassend scheint es bei der Montageprozessabsicherung an einer durchgängigen Methodik zu mangeln, die vorgibt zu welchem Zeitpunkt, in welcher Form welche Aspekte des Produkts und des geplanten Montagesystems abzusichern sind, wie die Absicherung dokumentiert und die Reife systematisch beurteilt werden kann. Insbesondere fehlt es an Ansätzen, welche die Möglichkeiten moderner Informationssysteme nutzen. Die Absicherung der geplanten Montageabläufe stellt eine sehr breite und interdisziplinäre Aufgabe dar. Wie bereits erwähnt, sind die Kompetenzen in großen Organisationen häufig auf einzelne Personen in unterschiedlichen Bereichen verteilt. *Müller* legt dar, dass auch die Aufgaben der produktionsbezogenen Absicherung in der Serienentwicklung häufig auf verschiedene Abteilungen, Phasen und Prozesse verteilt sind, die bei ihren Betrachtungen unterschiedliche Schwerpunkte setzen und jeweils eigene Systeme und Methoden nutzen [58, S. 45]. Eine solche Teilung der Verantwortlichkeiten bei der Absicherung kann zu mangelnder Transparenz, unzureichender Testabdeckung und einem erhöhten Kommunikationsaufwand führen.

Technische Änderungen und das Änderungsmanagement werden im Kontext von Schwierigkeiten in Vorserie und Anlauf ebenfalls häufig als Ursache genannt. *Dombrowski et al.* führen die Instabilität in diesen Phasen maßgeblich auf Änderungen an Produkt, Prozessen oder Betriebsmitteln zurück, insbesondere wenn diese kurzfristig und unzureichend geplant umgesetzt werden [5]. Es ist davon auszugehen, dass die aufgrund der noch andauernden Produkt- und Prozessentwicklung während der Prototypenphase zahlreich auftretenden Änderungen auch für den Prototypenbau eine Herausforderung darstellen.

Nach *Milling und Jürging* [12, S. 70-71] lassen sich neuerungs- und fehlerbedingte Änderungen unterscheiden. Zu ersteren zählen sie Anpassungen, die aus einem unvorhergesehenen Wandel der Entwicklungsaufgabe beispielsweise aufgrund von veränderten regulatorischen Anforderungen oder Marktanforderungen resultieren. Fehlerbedingte Änderungen führen sie auf Mängel im Entwicklungsprozess zurück. Laut ihrer Analyse handelt es sich bei mehr als der Hälfte aller Änderungen während der Entwicklungsphase um fehlerbedingte Änderungen. Dies ist bemerkenswert, da fehlerbedingte Änderungen ihrer Meinung nach durch präventive Maßnahmen weitgehend vermieden werden könnten. Zudem stellen sie fest, dass Anpassungen an Produkt und Prozess zur Vereinfachung der Herstellung die Hauptauslöser der fehlerbedingten technischen Änderungen darstellen. Dies kann ebenfalls als Hinweis auf Defizite in der Prozessabsicherung und dem Problemmanagement in den frühen Phasen der Serienentwicklung gewertet werden.

Mit Blick auf die Herstellung der Hardwareprototypen stellen Änderungen am Produktkonzept eine besondere Herausforderung dar. Aufgrund der langen Laufzeiten und hohen Kosten für die Beschaffung und Fertigung der Prototypenteile kommt es vor, dass die Versuchsfahrzeuge bei ihrer Fertigstellung bereits nicht mehr dem aktuellen Entwicklungsstand entsprechen. Dies kann sich negativ auf die Validität der Erprobungsergebnisse auswirken. Daher besteht hier einerseits die Anforderung bereits im Vorfeld durch virtuelle Methoden sowie durch eine frühzeitige Absicherung an den ersten Hardwareaufbauten eine möglichst hohe Produktreife zu erreichen und später umfassende Änderungen am Produktkonzept zu vermeiden. Andererseits sind Methoden und Verfahren erforderlich, die es ermöglichen Produktänderungen mit kürzerer Vorlaufzeit abzubilden.

Aus der untersuchten Literatur lassen sich zusammenfassend die folgenden Problemhypothesen (Defizite) ableiten:

- D1) Die Absicherung des geplanten Produktionssystems folgt keiner systematischen Vorgehensweise, vielmehr erfolgt sie erfahrungsbasiert und situativ.
- D2) Zergliederte Zuständigkeiten und Kompetenzen führen zu einem Mangel an Transparenz, unzureichender Testabdeckung und hohem Kommunikationsaufwand.
- D3) Daten und Informationen sind nicht durchgängig verfügbar, Abläufe werden nicht systematisch durch Informationssysteme unterstützt.
- D4) Die Reifegradmessung im Stage-Gate Prozess stellt aufgrund fehlender Daten und objektiver Bewertungsmodelle eine Herausforderung dar.

- D5) Defizite im Problem- und Änderungsmanagement (Nachhaltige Fehlerbehebung, Wissensmanagement) führen zu Verzögerungen, vermeidbaren technischen Änderungen und hohem Kommunikationsaufwand.
- D6) Die Abbildung von kurzfristigen Produktkonzeptänderungen bei Hardwareprototypen stellt aufgrund der Verfügbarkeit entsprechend angepasster Teile und inkonsistenter Entwicklungsstände eine Herausforderung dar.

3.1.2 Fallstudie in der Cockpitvormontage

Um die genannten Problemhypothesen in der Praxis zu prüfen und zusätzliche Erkenntnisse im Bereich der in der Literatur wenig vertretenen Prototypenmontage zu gewinnen, wurde eine Fallstudie bei der BMW Group in München durchgeführt, die im Folgenden beschrieben wird.

Als Betrachtungsbereich der Untersuchung wurde die Vormontage des Cockpits ausgewählt. Dieser Bereich deckt einen Großteil der in der Fahrzeugmontage relevanten Montagetätigkeiten ab und umfasst eine repräsentative Varianz. Aufgrund der überschaubaren Gesamtzahl an Komponenten und Prozessschritten bewegt sich die Komplexität jedoch in einem für die Untersuchung angemessenen Maß. Im Rahmen eines mehrtägigen Workshops mit mehreren Forschern der Universität Saarbrücken (Fachbereich Montagesystemtechnik) und des Zentrums für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA gGmbH Saarbrücken) wurde zunächst eine Prozessanalyse in der Serie und anschließend im Prototypenbau durchgeführt. Neben einer Begehung vor Ort und einer Prozessbeobachtung im Betrieb sowie einer Sichtung relevanter Unterlagen erfolgten dabei Gespräche mit den Werkern, Vorarbeitern, Meistern und Planern sowie eine Befragung mittels Online-Fragebogen. Zusätzlich wurden Daten aus der Absicherungsplanung und dem Problemmanagement analysiert, um ein besseres Verständnis der Problemschwerpunkte zu erlangen.

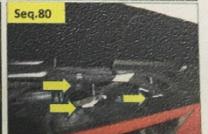
3.1.2.1 Anlauf und Serie

In dem betrachteten Serienwerk werden auf einer Montagelinie bis zu fünf Derivate einer Modellreihe im drei-Schicht Betrieb gebaut, es handelt sich also um eine MMAL. Zum Zeitpunkt der Studie fand der Hochlauf der Serienproduktion des ersten Derivats einer neuen Derivatsfamilie statt. Die Integration wurde als fließender Übergang realisiert, indem die Produktion des alten Modells über einige Wochen hinweg reduziert und die Stückzahlen der Vorserienproduktion des neuen Derivats sukzessive gesteigert wurden.

Die Montage der Fahrzeugprototypen erfolgt in dem untersuchten Unternehmen im Vorfeld der Vorserienproduktion durch besonders erfahrene und qualifizierte Mitarbeiter aus dem Serienwerk, die dafür in das Prototypenwerk abgestellt werden. Dieses Vorgehen soll den Wissenstransfer begünstigen und eine frühzeitige Einbindung des Serienpersonals in den Planungsprozess ermöglichen. Durch diese Anlauftrainer genannten Mitarbeiter erfolgt zusammen mit den Realisierungsplanern die Erstellung der Trainingsunterlagen für die Qualifizierung der restlichen Serienmitarbeiter des jeweiligen Bereichs. Die Arbeitsinhalte werden dazu je Montageplatz in einem sogenannten Standardarbeitsblatt dokumentiert und in Papierform dem Vorarbeiter übergeben. **Abbildung 16** zeigt ein solches Dokument. In diesem Beispiel sind die Arbeitsschritte im Bereich der Montage des Head-Up-Displays beschrieben. Nachdem alle

Werker eine theoretische Einführung in die neue Montageaufgabe erhalten und ein Training an einem Schulungsfahrzeug in einer separaten Zone absolviert haben wird die Produktion der Vorserienfahrzeuge auf der regulären Montagelinie gestartet. Die zunächst sporadisch eingetakteten Einheiten des neuen Modells werden dabei von den Anlauftrainern sowie einigen zusätzlichen Mitarbeitern auf dem Weg durch die Montage begleitet, um den regulären Mitarbeitern bei den neuen Aufgaben Hilfe zu leisten. Mit steigendem Trainingsgrad der Mitarbeiter wird über mehrere Wochen hinweg der Anteil des neuen Modells gesteigert und die Unterstützung durch zusätzliche Mitarbeiter reduziert. In der Folge werden die Mitarbeiter auch für die Tätigkeiten an anderen Stationen innerhalb ihres Bereichs qualifiziert, um eine horizontale *job-rotation* zu ermöglichen. Sobald alle Mitarbeiter ausreichend qualifiziert wurden, die Montageprozesse stabil ablaufen (auf die als Herstellbarkeitsnachweis bezeichnete abschließende Prüfung des Montagesystems wird im Abschnitt 3.1.2.3 noch detailliert eingegangen) und die geplante Stückzahl erreicht ist, gilt die Integration des Fahrzeugprojekts als abgeschlossen und die reguläre Produktion von Kundenfahrzeugen beginnt (SoP).

| Standardarbeitsblatt (SAB) | | | | | | | | | | |
|----------------------------|----|------|--------------------------------|--|----|---------|---------|--------|-------------------|---|
| Takt-Nummer: 120090 | | | Bezeichnung: I-Tafel montieren | | | | | | | |
| Prozess | | | | | | Bauteil | | | Q-Thema / Hinweis | |
| Bew. | SA | Seq. | TVG-Nr. | Prozessschritt, TVG-Bezeichnung | TM | Stk | Sachnr. | Anzahl | Beschreibung | |
| | | 10 | | BVIS Abgleichen | | | | | | |
| | | 20 | | Fedelhilfe auf Lensäule stecken | | | | | | |
| | X | 30 | | HUD aus Bereitstellung holen Scannen | | | | | | |
| | X | 40 | | HUD anstecken und verschrauben | | | | | Erst anheften | Reihenfolge beachten |
| | | 50 | | IHKA-Steuergerät anstecken | | | | | | Stecker sichern |
| | | 60 | | I-Tafel auf Tragrohr fügen und Indenterfassung | | | | | | li und re in Halterung- Tragstruktur |
| | | 70 | | I-Tafel verschrauben | | | 8263913 | 6 | Schraube 2,4 Nm | Schraureihenfolge, Mitte zuerst |
| | | 80 | | KBB mitte verlegen | | | | | | Unterschied RL zu LL |
| | | 90 | | | | | | | | |

| Arbeitsergebnis / Foto / Spaghettidiagramm | | | | |
|---|---|---|--|--|
|  |  |  |  | |
|  |  |  |  | |

Anzahl Mitarbeiter: 1 Taktausgleich: min. Abtaktung:

Abbildung 16: Beispiel eines Standardarbeitsblatts mit Montage Tätigkeiten und Illustrationen

Durch den Ansatz die Werker während der fortlaufenden Produktion des Vorgängermodells zu trainieren, lässt sich der Verlust von Einheiten während der Umstellung auf ein Minimum reduzieren. Jedoch verlängert sich dadurch gegenüber einer radikaleren Vorgehensweise, bei der ohne Übergangsphase umgestellt wird, auch die Dauer bis zum Erreichen der geplanten Kapazität, also die *time-to-volume*. Zudem wird in der Übergangsphase zusätzliches Personal benötigt. Bei der Anlaufstrategie handelt es sich daher um eine Entscheidung, die individuell auf Basis der Unternehmensziele und -situation zu treffen ist.

Die Cockpitvormontagelinie ist in einem von der restlichen Montage räumlich getrennten Bereich untergebracht und als Fließfertigung gestaltet (vgl. **Abbildung 17**). Die Montage der

Cockpits erfolgt vollständig manuell durch 14 Mitarbeiter an 13 Arbeitsstationen, lediglich der Transport des Montageobjekts verläuft automatisiert durch eine Elektrohängebahn mit schwenkbarem Werkstückträger. Die Bereitstellung der Komponenten erfolgt in Regalen entlang der Montagelinie, einige Komponenten mit besonders hoher Varianz werden bereits in fahrzeugspezifisch vorkommissionierten Behältern bereitgestellt. Die Montage des Klimageräts erfordert aufgrund des hohen Gewichts zwei Mitarbeiter, an den restlichen Stationen bearbeitet jeder Werker seine Umfänge individuell. Die Taktzeit liegt bei etwa 60 Sekunden.

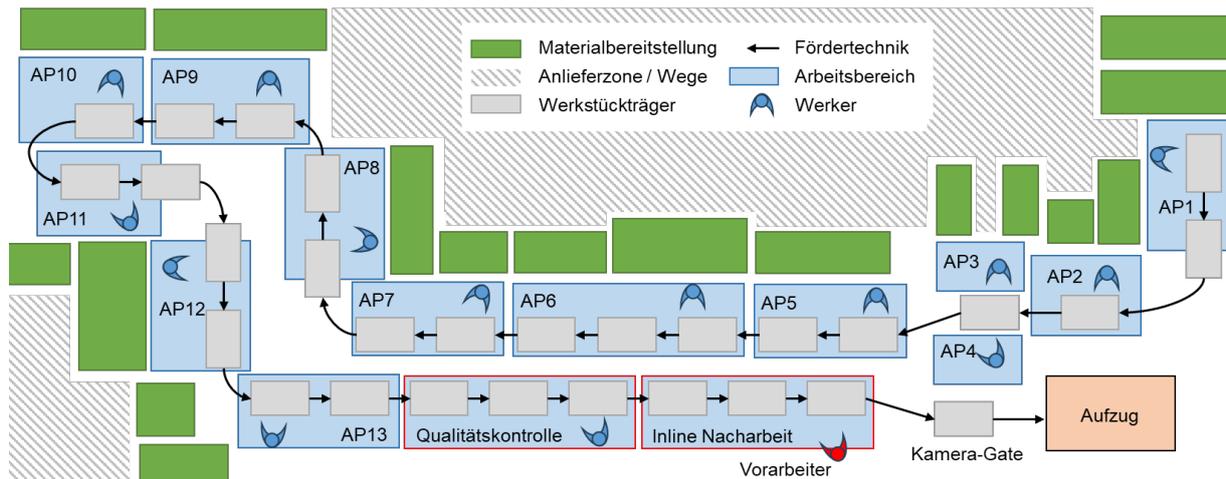


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Cockpitmontagelinie

Am letzten regulären Arbeitsplatz der Linie findet eine Qualitätskontrolle statt. Abschließend folgt ein Bereich für Inline-Nacharbeit bevor das fertig vormontierte Cockpit-Modul über ein Aufzugsystem und einen Puffer automatisiert zum Einbau an das Hauptband transportiert wird.

Abbildung 18 zeigt die Endzone der Cockpitlinie mit den fertig vormontierten Cockpits.



Abbildung 18: Endzone der Cockpitmontagelinie im BMW Werk München (BMW Group 2018)

Für die Montage werden neben akkubetriebenen Pistolen- und Winkelschraubern mit fest eingestellten Drehmomenten zwei Schraubanlagen für sicherheitsrelevante Verbindungen mit Dokumentationspflicht im Bereich der Lenkung und der Airbags genutzt. Die Handwerkzeuge sind mit gummierten Kunststoffverkleidungen ausgestattet, um eine Beschädigung des Produkts zu vermeiden. Zusätzlich kommen einige Spezialwerkzeuge für das Eindrücken von Clip-Verbindungen, das Fädeln von Leitungen sowie Justagearbeiten zum Einsatz.

An Arbeitsplätzen mit mehreren, vor Ort bereitgestellten Varianten wird den Werkern die jeweils zu montierende Variante über ein einfaches, monitorbasiertes Informationssystem angezeigt, wie in **Abbildung 19** gezeigt. Das System nutzt Produktbilder, Farben und Symbole, ist auf die effiziente Vermittlung geringer Informationsmengen ausgelegt und ermöglicht keine Interaktion. In diesem Fall wird angezeigt, um welchen Antrieb und um welche Ländervariante es sich handelt. Was bei welcher Konfiguration zu tun ist, muss der Werker auf Basis seines Trainings entscheiden. Weiterhin ist ein System zur Qualitätskontrolle und Aufbaudokumentation vorhanden, in dem Prozessdaten gespeichert, Mängel dokumentiert und fahrzeugspezifisch bestimmte Prüfschritte quittiert werden.



Abbildung 19: Anzeige des Varianteninformationssystems

Den befragten Mitarbeitern zufolge verlief die Integration des neuen Modells im Bereich der Cockpitmontage vergleichsweise reibungslos, es traten keine folgenschweren Probleme auf und der geplante Zeitplan konnte weitgehend eingehalten werden. Die vorangegangene umfangreiche Absicherung mit mehreren hundert Prototypen in Kombination mit der überschaubaren Menge an Neuerungen im Cockpit gegenüber dem Vorgängermodell scheinen hierzu maßgeblich beigetragen zu haben. Auf Basis der Beobachtungen und Gespräche konnte dennoch an einigen Stellen Optimierungspotenzial identifiziert werden.

Die manuelle Erstellung der Arbeitsanweisungen auf Basis der rudimentär dokumentierten Vorgaben der Montageplanung sowie die Anreicherung mit entsprechenden Fotos und Illustrationen gestaltet sich sehr aufwändig. Auch die Konfiguration des Varianten-Informationssystems und des Qualitätssystems und die Programmierung der Schraubanlagen erfolgt zeitintensiv und fehleranfällig über manuelle Abläufe. Zwischen den jeweils genutzten Anwendungen existieren bislang keine Verbindungen. Es mangelt an einer durchgängigen Datenhaltung und automatisiertem Datenaustausch. Entsprechend müssen die Dokumente und Konfigurationen

auch bei Änderungen an Produkt oder Prozess manuell aktualisiert und ausgetauscht werden. Inkonsistenzen zwischen den unterschiedlichen Systemen führen dabei regelmäßig zu Problemen und Verwirrung. Die Kommunikation zu den Werkern erfolgt überwiegend hierarchisch und verbal von den Meistern über die Vorarbeiter und Anlauftrainer. Diese Vorgehensweise ist verzögerungsbehaftet, fehleranfällig und nur begrenzt skalierbar.

Neben dem zusätzlichen Personal zur Unterstützung der regulären Arbeiter während des Hochlaufs waren in einigen Bereichen auch weit über den SoP hinaus mehr Arbeiter erforderlich als ursprünglich vorgesehen, da geplante Prozesse nicht wie angenommen realisiert werden konnten oder zu optimistische Annahmen bzgl. der erreichbaren Ausführungszeiten getroffen wurden. Dies deutet auf eine unzureichende Absicherung unter seriennahen Bedingungen sowie eine ungenügende Berücksichtigung der Herstellbarkeit in der Produktentwicklung (*design for manufacturability*) hin. Dass während der gesamten Vorserie und auch nach dem SoP noch Produktänderungen umgesetzt wurden, verursachte zusätzlichen Kommunikations- und Abstimmungsaufwand und wirkte sich zumindest kurzzeitig nachteilig auf die Stabilität der Produktion aus. Andererseits konnten einige aus Montagesicht ungünstige Konstruktionen aus Kostengründen nicht mehr angepasst werden. Beispielsweise wurde bemängelt, dass eine aus der Vergangenheit bereits als beschädigungsanfällig bekannte Gestaltung einer Dekorleiste, die zwischenzeitlich für ein anderes Derivat optimiert wurde erneut nach dem alten Konzept zum Einsatz kam. Hier scheint der unternehmensinterne Lern- und Wissensmanagementprozess im Hinblick auf die produktionsgerechte Produktgestaltung versagt zu haben.

Die Montageplanung erfolgte in dem betrachteten Fahrzeugprojekt in zwei Phasen, der Konzept- und der Realisierungsplanung, durch jeweils unterschiedliche Planer aus der Zentralen Planungsstelle. Von den Realisierungsplanern wurde das Projekt dann in der Vorserienphase an die Ausführungsplanung im Werk übergeben, die für die Betreuung der Serie, Umplanungen (z.B. bei Nachfrageschwankungen) und Optimierungen bis zum EoP zuständig ist. Diese Aufteilung der Verantwortlichkeiten wurde mehrfach kritisiert, da sie eine ganzheitliche Betrachtung erschwert und zu geringerer Motivation, unzureichender Planungsqualität sowie dem Verlust von Wissen und Erfahrung zu führen scheint. Die Planung erfolgte phasenspezifisch in unterschiedlichen Systemen, Anpassungen in der laufenden Serie wurden nicht zwingend systematisch dokumentiert. Dies führt bei der Integration neuer Modelle zu Schwierigkeiten, da der Datenstand der Konzeptplanung einige Jahre später nicht mehr dem realen Zustand der Serie entspricht.

3.1.2.2 Prototypenbau

Parallel zum Hochlauf des ersten Modells der neuen Derivatsfamilie im Serienwerk erfolgte im Prototypenbau die Produktion der Gesamtfahrzeugprototypen für die abgeleiteten Modelle (andere Bauformen wie Cabrio, Coupé und Kombi). Da sich die Umfänge des Cockpits zwischen den Modellen einer Familie nur geringfügig unterscheiden, profitieren die späteren Anläufe von den Erfahrungen des Erstanlaufs und ein Großteil der erprobten Prozesse konnte übernommen werden. In dem vorliegenden Fall werden die Folgenderivate jedoch in einem anderen Serienwerk mit einer abweichenden Linienstruktur produziert, weshalb einige Anpassungen an den Abläufen vorgenommen werden mussten.

Das Produktionsprogramm im Prototypenbau wird im Wesentlichen durch die Anforderungen der Produktentwicklungsabteilungen bestimmt. Diese melden ihren Bedarf an Versuchsfahrzeugen, die gewünschten Konfigurationen sowie die Bedarfszeitpunkte an eine Planungsstelle, welche die Anforderungen priorisiert und die Programmplanung erstellt. Die Konfiguration der Fahrzeuge erfolgt dabei durch die Definition eines Basistypen (Typschlüssel) sowie die Auswahl von Ausstattungsvarianten. Auf Basis des Typschlüssels, der Ausstattungscodes und dem geplanten Produktionstermin wird anschließend durch ein zentrales System der Produktentwicklung die Stückliste der Versuchsfahrzeuge erstellt und an das MES des Prototypenwerks übertragen. Anhand dieser Stücklisten erfolgt die Beschaffung der Komponenten sowie die fahrzeugspezifisch vorkommissionierte Bereitstellung in der Prototypenmontage. Die zeitliche Planung der Prototypenmontage erfolgt rudimentär und manuell per Tabellenkalkulation. Sie basiert auf Erfahrungswerten, unterliegt einer hohen Unsicherheit und muss laufend angepasst werden, da wesentliche Faktoren wie Teileverfügbarkeit und Durchlaufzeiten im Vorserienumfeld stark schwanken und unvorhergesehene Änderungen sowie Probleme häufig zu Verzögerungen führen. Dieses Umfeld erfordert auch von den Werkern und Vorarbeitern ein gewisses Maß an Flexibilität und Koordination, da die Abläufe wenig planbar und standardisiert sind.

Die Montage der Prototypen erfolgt durch erfahrene Mitarbeiter der Werke, in denen künftig die Serienfertigung stattfinden wird. Zu Beginn eines Projekts erhalten diese zunächst eine Unterweisung zu den spezifischen Abläufen und Anforderungen im Prototypenbau, beispielsweise die Erstellung der detaillierten Aufbaudokumentation und die Kontrollmaßnahmen bei sicherheitskritischen Umfängen. Das erste Fahrzeug wird dann unter großzügig bemessener Durchlaufzeit über mehrere Tage hinweg im Beisein der für die jeweiligen Umfänge zuständigen Planer, Entwickler und Konstrukteure aufgebaut und dient dazu die Werker mit dem neuen Produkt und den groben Abläufen vertraut zu machen. Zudem werden die Stücklisten und die Bereitstellung korrigiert. Bei den folgenden Fahrzeugen werden die Abläufe dann weiter optimiert und die Durchlaufzeiten sukzessive reduziert, bis sich die Produktion im mittleren einstelligen Bereich pro Tag stabilisiert. Auch in diesem Stadium sind die Abläufe hinsichtlich Standardisierung und Stabilität jedoch keineswegs mit einer Serienproduktion zu vergleichen. Aufgrund zahlreicher Sonderanforderungen der Entwicklungsstellen, die über sogenannte Bauabweichungen eingesteuert werden, handelt es sich praktisch bei jedem Prototyp um ein Unikat.

Das Umfeld des Prototypenbaus gleicht dabei eher dem einer Werkstatt oder Manufaktur als dem der Serienproduktion. Es wird zwar auch hier von Linien gesprochen, dabei handelt es sich jedoch um eine lose gekoppelte Reihenmontage die jeweils in neun Zonen untergliedert ist, wie in **Abbildung 20** dargestellt. Die Karosserie wird dabei auf rollbaren Werkstückträgern manuell von einer Zone zur nächsten transportiert. Die zu verbauenden Komponenten werden in fahrzeug- und zonenspezifisch vorkommissionierten Behältern in einer zentralen Logistikzone bereitgestellt, aus der sie durch die Mitarbeiter der jeweiligen Zone nach dem Pull-Prinzip abgeholt werden. Lediglich variantenarme Kleinteile und Schüttgut wie Schrauben werden in entsprechenden Regalen direkt in der Zone vorgehalten.

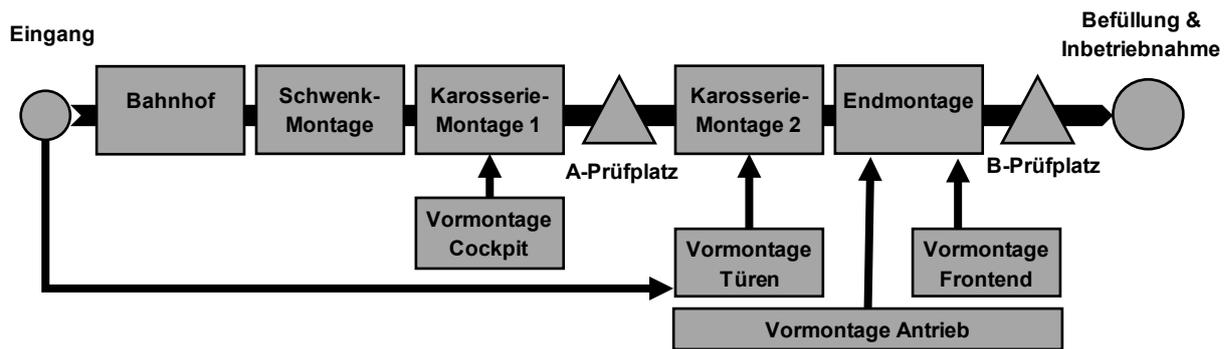


Abbildung 20: Struktur einer Linie in der Prototypenmontage bei der BMW Group

Eingangs werden in einem zentralen Bereich die Türen und Klappen der lackierten Karosserien demontiert, Hohlräume ausgeschäumt und die Fahrgestellnummern geprägt, anschließend beginnt die eigentliche Fahrzeugmontage in der Zone „Bahnhof“ mit dem Verlegen der Kabelbäume und dem Innenausbau. In der mit einem schwenkbaren C-Gehänge für die Aufnahme der Karosserie ausgestatteten Zone „Schwenkmontage“ werden Leitungen und Komponenten im Unterbodenbereich montiert. Es folgt der Einbau des vormontierten Cockpits und der Mittelkonsole in der Zone „Karosseriemontage 1“, anschließend wird eine erste Prüfung der Bordelektronik (A-Prüfplatz) vorgenommen. Sofern hierbei keine Probleme auftreten, wird der Innenausbau in der Zone „Karosseriemontage 2“ durch Einbau der Sitze, der Rückbank und der vormontierten Türen komplettiert. Im Rahmen der Hochzeit wird der auf einer fahrbaren Vorrichtung vormontierte Antriebsstrang bestehend aus Motor, Getriebe und Achsen mit der Karosserie verbunden. Dazu wird die Karosserie in der Zone „Endmontage“ in einem Gehänge aufgenommen, der Antriebsstrang darunter gefahren, angehoben und manuell verschraubt. In dieser Zone werden ebenfalls die Reifen sowie das vormontierte Frontend (Stoßfänger) montiert. Abschließend erfolgt eine zweite Prüfung der Elektronik, die Befüllung des Fahrzeugs mit Betriebsstoffen sowie die Inbetriebnahme, welche auch die Einstellung der Spur und der Scheinwerfer sowie die Kalibrierung diverser Sensorik auf einem entsprechenden Prüfstand umfasst. Abschließend werden alle Fahrzeugprototypen vor der Übergabe an die Verwender einer Qualitätskontrolle und einer Testfahrt unterzogen.

Die Montagezeit je Zone beträgt mehrere Stunden. Dabei werden durch zwei bis drei Werker in einer Zone Arbeitsinhalte abgearbeitet, die in der Serie auf mehrere Bänder bzw. Liniensegmente und dutzende Arbeitsplätze verteilt sind. Dedizierte Nacharbeitsplätze sind in der Montage nicht vorgesehen. Kleinere Nacharbeiten erfolgen mit entsprechender Auswirkung auf den Zeitplan inline, umfangreichere Probleme werden in Analysebereichen der Inbetriebnahme bearbeitet.

Die Montage erfolgt überwiegend mit konventionellen Handwerkzeugen und Akkuschraubern. Für einige sicherheitskritische Verschraubungen werden insbesondere im Bereich des Fahrwerks Schraubanlagen eingesetzt. Modellspezifisch können Sonderanlagen und Vorrichtungen, beispielsweise für Justagen zum Einsatz kommen. Lediglich das Verkleben der Türdichtungen und des Panoramadachs erfolgt automatisiert durch Roboterstationen. Die Informationsbereitstellung und Koordination erfolgt zum einen verbal im Rahmen der Morgenrunden, zum anderen stehen in jeder Zone PC-Arbeitsplätze zur Verfügung über die das MES mit den

hinterlegten Stücklisten und der Programmplanung aufgerufen werden kann. Während der Montage werden alle Komponenten per optischem Scanner erfasst und mit der Soll-Stückliste des MES abgeglichen. Steuergeräte, elektrische Steckverbindungen und kritische Verschraubungen werden zusätzlich mittels vorgefertigter Listen in Papierform dokumentiert.

Neben der Montagetätigkeit agieren die Werker des Prototypenbaus auch als Sensor für Defizite in Produkt und Montageprozessen. Festgestellte Fehler und Unzulänglichkeiten werden von ihnen mittels Fotos und textueller Beschreibung digital als Office-Dokument oder in Papierform dokumentiert und an ihren Zonensprecher gemeldet. Dieser wiederum leitet die Meldungen an den Koordinator der Montagelinie bzw. den Projektverantwortlichen weiter, welcher letztlich für die Ermittlung eines Lösungsverantwortlichen und ggf. die Erstellung eines Eintrags im abteilungsübergreifenden Problem-Management-System zuständig ist. Operative Probleme wie fehlende oder schadhafte Bauteile werden hingegen direkt mündlich oder telefonisch an einen Vertreter der Logistik gemeldet, der kurzfristig eine Nachlieferung veranlasst. Bei fehlenden Informationen oder Unklarheiten hat der Werker neben der Einsicht in das MES die Möglichkeit die Produktentwicklung oder Montageplanung direkt zu kontaktieren, sofern ihm entsprechende Kontakte bekannt sind.

Als dritte Aufgabe sind die Werker angehalten ihre Arbeitsabläufe und Erkenntnisse als Basis für den Wissenstransfer zu den Mitarbeitern der Serie zu dokumentieren. Zusammen mit den Arbeitsanweisungen aus dem System der Montageplanung werden daraus im Anschluss an die Prototypenphase die Unterlagen für das Training der Serienwerker zusammengestellt.

Um über den direkt untersuchten Bereich der Cockpitvormontage hinaus einen Einblick in die Abläufe der restlichen Prototypenmontage zu erhalten und ggf. weitere Optimierungspotenziale zu identifizieren, wurde im Rahmen der Fallstudie ein Online-Fragebogen (siehe Anhang A) entwickelt und an die Mitarbeiter der Prototypenmontage gesendet. Der Schwerpunkt der Befragung wurde auf die Rolle von Information, Transparenz sowie Probleme und den Umgang mit diesen in der Montage gelegt. Der Fragebogen ist in acht Abschnitte unterteilt, setzt sich aus Multiple-Choice, Bewertungs- und Freitextfragen zusammen und richtet sich an Mitarbeiter aller operativer Funktionen und Ebenen der Prototypenmontage. Innerhalb des zweiwöchigen Bearbeitungszeitraums haben 32 der 38 zur Befragung eingeladenen Personen an der Befragung teilgenommen.

Die Erprobung, Optimierung und Absicherung der Montageprozesse im Hinblick auf die Serienproduktion sehen 75 % der Befragten als eine der Kernaufgaben der Prototypenmontage an, jedoch sind 69 % der Meinung, dass diese Aufgabe heute nicht optimal erfüllt wird und der Serienanlauf besser vorbereitet werden könnte. Den Wissenstransfer aus der Prototypenmontage in die Produktentwicklung und Planung bewerten lediglich 41 % der befragten positiv, in Richtung der Serienproduktion fällt der Anteil positiver Bewertung mit 63 % höher aus. Insgesamt scheint das Thema Wissensmanagement jedoch optimierungsfähig. Bei der Datenerhebung und Informationsbereitstellung bestehen offenbar ebenfalls deutliche Defizite. Während die Verfügbarkeit operativ essentieller Informationen wie Produktionsprogramm und aufzubauende Fahrzeugkonfiguration 69 % der Befragten als ausreichend bewerten, beurteilen über 75 % die Ihnen zur Verfügung stehenden Informationen zu geplanten Montageprozessen als unzureichend. Informationen zu Änderungen an Produkt und Prozessen bewerten 66 % bzw.

75 % als ungenügend. Die Transparenz zu Abläufen und Status der Prototypenmontage wird von 62 % der Teilnehmer als unzulänglich betrachtet, bzgl. der Anlauftauglichkeit bzw. Reife eines Fahrzeugprojekts sehen 75 % Verbesserungsbedarf.

Bei der Dokumentation von auftretenden Problemen und erkannten Defiziten sind der Befragung zufolge die Regelprozesse nicht vollständig und klar verständlich definiert, zudem werden sie in der Praxis nicht konsequent eingehalten. 50 % der Befragten geben an, nicht zuverlässig beurteilen zu können, ob ein Problem erfasst und falls ja auf welchem Weg es gemeldet werden muss. Die Meldung erfolgt dabei häufig mündlich, in Form von handschriftlichen Notizen oder mittels Office-Software. Ein IT-System für das Problemmanagement ist zwar vorhanden, wird aber aufgrund des beträchtlichen Aufwands nur bei schwerwiegenden Defiziten hinsichtlich des Produktkonzepts genutzt. Der Informationsgehalt der Problemmeldungen scheint unzureichend zu sein; 91 % bzw. 84 % geben an, dass häufig Rückfragen oder persönliche Gespräche im Rahmen der Problemlösung erforderlich sind. Für 91 % der Befragten stellen persönliche Kontakte ein wesentliches Kriterium für eine effiziente Problemmeldung und -lösung dar. Da Informationen zu bereits dokumentierten Problemen nicht effizient zugänglich sind, werden Sachverhalte oft mehrfach gemeldet. 75 % bewerten die Transparenz zum Status der von ihnen gemeldeten Probleme als unzureichend, 56 % beurteilen die Problemlösungsdauer als zu lang.

Fehlende oder schadhafte Komponenten sowie fehlende, fehlerhafte oder unvollständige Informationen stellten laut Einschätzung der Befragten die am häufigsten auftretenden Probleme bei der Prototypenmontage dar. Als besonders zeitaufwändige Probleme wurden Fehler und Schäden an der Karosserie genannt, die in vorgelagerten Qualitätskontrollen nicht bemerkt oder beim nachfolgenden Transport verursacht werden.

Zur Eignung der Prototypenmontage für die Absicherung der Serienmontageprozesse wurden die Teilnehmer hinsichtlich der folgenden acht Aspekte befragt:

- 1) Montierbarkeit: Die geometrische Konsistenz ist grundsätzlich gegeben, ausreichend Freiräume und geeignete Einbaupfade sind vorhanden. 81 % bewerten diesen Aspekt als vollständig oder größtenteils überprüfbar.
- 2) Montagereihenfolge: Die vorgegebene Reihenfolge beim Einbringen von Komponenten ist realisierbar (Montierbarkeit, Zugänglichkeit der Montagestellen) und effizient (Minimierung nicht wertschöpfender Anteile wie z.B. Vermeidung unnötiger Wechsel der Arbeitsräume). 72 % bewerten diesen Aspekt als vollständig oder größtenteils überprüfbar.
- 3) Verbindungsreihenfolge: Wenn eine Komponente / eine Baugruppe mit mehreren Verbindungsstellen befestigt wird und die Reihenfolge der Verbindung funktionale oder geometrische Auswirkungen hat (z.B. Verzug, Spaltmaße), ist die Verbindungsreihenfolge vorgegeben und ihre Einhaltung sichergestellt. 59 % bewerten diesen Aspekt als vollständig oder größtenteils überprüfbar.
- 4) Fehlhandlungssicherheit: Es ist sichergestellt, dass keine Komponenten oder Tätigkeiten vergessen oder falsche Komponenten verbaut werden, dass die Montage

korrekt ausgeführt wird und Beschädigungen ausgeschlossen sind. 40 % bewerten diesen Aspekt als vollständig oder größtenteils überprüfbar.

- 5) Produktvarianz: Alle möglichen Varianten / Kombinationen des Produkts sind mit den definierten und abgesicherten Montageprozessen herstellbar. 31 % bewerten diesen Aspekt als vollständig oder größtenteils überprüfbar.
- 6) Eignung der Betriebsmittel: Die geplanten Betriebsmittel sind für die Erfüllung der Montageaufgabe geeignet. 28 % bewerten diesen Aspekt als vollständig oder größtenteils überprüfbar.
- 7) Wiederholgenauigkeit / Prozessstabilität: Der Montageprozess ist von den Werkern mit entsprechendem Trainingsgrad in der vorgegebenen Zeit zuverlässig mehrere hundertmal je Schicht mit gleichbleibender Qualität erfüllbar. 16 % bewerten diesen Aspekt als vollständig oder größtenteils überprüfbar.
- 8) Ergonomie: Durch die Montageaufgabe entsteht bei der zu erwartenden Anzahl an Wiederholungen keine gesundheitliche Gefährdung (z.B. durch monotone Haltung, einseitige Belastung oder hohe Montagekräfte) für die Werker. 28 % bewerten diesen Aspekt als vollständig oder größtenteils überprüfbar.

Als wesentliche Hindernisse bei der Absicherung der geplanten Serienmontageprozesse im Rahmen der Prototypenmontage wurden fehlende Information (29 Nennungen), unzureichende Bauteilqualität bzw. geringe Produktreife (25 Nennungen), zu geringe Prozessreife (14 Nennungen), sowie Unterschiede im Montageumfeld (keine Fördertechnik, geringerer Zeitdruck, andere Betriebsmittel, abweichende Materialbereitstellung, kein Derivatemix – 19 Nennungen) angeführt.

Auf Basis der Beobachtungen im Rahmen der Fallstudie, einer mehrwöchigen Begleitung der Arbeit in der Cockpitvormontage durch den Autor sowie die Ergebnisse der Mitarbeiterbefragung kann festgestellt werden, dass die Prototypenmontage insgesamt eine vergleichsweise geringe Effizienz aufweist. Der zeitliche Aufwand für sekundäre Montagefunktionen, Logistik-tätigkeiten, Dokumentation, Koordination und Informationsbeschaffung sowie Wartezeiten liegt in etwa auf demselben Niveau wie der Anteil der wertschöpfenden Montagetätigkeiten, teilweise auch darüber. Es kommt vielfach zu Verzögerungen und das Gesamtsystem weist eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Störungen auf. Die Maßnahmen zur Sicherstellung eines korrekten Aufbaus (beispielsweise die Erfassung der verbauten Komponenten per optischem Strichcode-Scanner oder die Stempellisten) zeigen eine geringe Wirksamkeit und werden häufig vernachlässigt oder umgangen. Fehler, die erst in späteren Zonen entdeckt und entsprechend aufwändig behoben werden müssen, sind oftmals die Folge. Es ist auch von einer gewissen Quote an Fehlern auszugehen, die mangels offensichtlicher funktionaler Auswirkungen und trotz anschließender Qualitätskontrolle unentdeckt bleiben. Falsche Anzugsdrehmomente oder vergessene Verbindungselemente stellen Beispiele für derartige Fehler dar, die sich später durchaus negativ auf die Validität der Erprobungsergebnisse auswirken können.

Die Erstellung der Aufbaudokumentation ist zeitaufwändig, das Resultat jedoch hinsichtlich inhaltlicher Korrektheit und Informationsgehalt unzureichend. Zudem erschwert ihre Form (nicht standardisierte, handschriftlich ausgefüllte Papierlisten sowie die digitale, jedoch in einem proprietären Format gespeicherte Ist-Stückliste im MES) die weitere Verwendung.

Informationen zu den für die Serie geplanten Montageabläufen erhalten die Werker lediglich im Rahmen von sporadisch stattfindenden Gesprächen mit den Planern und teilweise in Form von Auszügen aus dem Montageplanungssystem. Aktuelle und vollständige Information zu dem jeweils aktuellen Planstand liegen nicht vor, entsprechend ist auch eine konsequente Einhaltung und damit eine Validierung der geplanten Abläufe nicht möglich. Defizite im Planstand können daher nicht zuverlässig erkannt werden. Stattdessen erarbeiten sich die Werker auf Basis ihrer Erfahrung selbstständig Prozesse und Vorgehensweisen. Diese werden jedoch ebenfalls nicht stringent eingehalten und auch nicht dokumentiert.

Da für Probleme kein einheitlicher Meldeweg existiert, muss der Werker auf Basis des Fehlerbildes eine Annahme zur Fehlerursache treffen und den entsprechenden Ansprechpartner kontaktieren. Ein Fehlerbild kann jedoch durchaus verschiedene Ursachen haben, die entsprechend unterschiedlich zu behandeln sind. Ein fehlendes Bauteil kann beispielsweise schlicht auf einen Fehler bei der Kommissionierung zurückzuführen und durch eine Nachlieferung zu beheben sein, es kann sich aber auch um ein grundlegendes Problem im Produktkonzept bzw. in der Produktstruktur und den daraus abgeleiteten Stücklisten handeln. Der Werker verfügt weder über die notwendigen Informationen noch die Expertise um die Fehlerursache zuverlässig zu identifizieren. Da die Meldung konzeptioneller Defizite mit Dokumentationsaufwand verbunden ist und häufig zu Nachfragen führt, werden Probleme im Zweifel eher selbstständig gelöst und nicht dokumentiert. Auch für Verbesserungsvorschläge oder Anregungen an Konstruktion und Planung existiert kein standardisierter Prozess.

Die Dokumentation der Montageabläufe als Basis für die Erstellung der Trainingsunterlagen für den Wissenstransfer zu den Serienmitarbeitern erfolgt durch die Anlauftrainer neben der regulären Montagetätigkeit je nach individueller Präferenz in digitaler Form oder handschriftlich. Aufgrund der unzureichenden Abstimmung mit den Planern ergeben sich dabei oftmals Inkonsistenzen zwischen den Vorgaben der Montageplanung und den Beschreibungen der Anlauftrainer. Aufgrund dieser Inkonsistenzen und spät einfließenden Änderungen muss die Dokumentation laufend angepasst werden, dabei wird einige Arbeit mehrfach geleistet. Die resultierende Qualität ist dabei stark von den Fähigkeiten und der Motivation des jeweiligen Mitarbeiters abhängig.

Zu den Abläufen in der Prototypenmontage herrscht im untersuchten Fall insgesamt eine geringe Transparenz. Die Werker sind angehalten den Beginn und den Abschluss der Montage eines Fahrzeugs in ihrer Zone zu dokumentieren, jedoch erfolgt dies nicht stringent und systematisch. Daher sind weder die gesamten Durchlaufzeiten noch die Montagedauer je Zone bekannt. Auch werden Störungs- und Wartezeiten sowie Nacharbeitsaufwände nicht erfasst. Die Überwachung des Montagefortschritts eines Fahrzeugs sowie ggf. eine frühzeitige Information oder Reaktion bei Verzögerungen ist somit nicht möglich.

Die Beobachtungen, Gespräche sowie die Mitarbeiterbefragung legen nahe, dass die Montage der seriennahen Fahrzeugprototypen bislang weitgehend ungenutztes Potenzial für die Absicherung der geplanten Serienmontageabläufe bietet. Grundlegende Aspekte wie die Montierbarkeit in der geplanten Sequenz und Fügeprozesse lassen sich in dem betrachteten Umfeld grundsätzlich umfassend und valide bewerten, andere Aspekte wie Fehlhandlungssicherheit oder Ergonomie zumindest teilweise. Hinsichtlich Prozessstabilität, Ausführungszeiten und

Produktvarianz gestalten sich aussagekräftige Evaluationen in der Prototypenmontage hingegen schwierig, da wesentliche Rahmenbedingungen der Serie nicht gegeben bzw. nur unzureichend simulierbar sind. Aufgrund des hohen Schadenspotenzials spät erkannter Defizite scheint es dennoch zweckmäßig zu untersuchen, wie die Prototypenmontage intensiver für die Prozessabsicherung genutzt werden kann.

Zudem ist zu erwarten, dass sich durch die Digitalisierung in Entwicklung und Planung einige der bestehenden Hindernisse reduzieren und die Rahmenbedingungen verbessern lassen.

3.1.2.3 Montageprozessabsicherung außerhalb der Prototypen- und Vorserienproduktion

Neben der Validierung der Montierbarkeit im Rahmen der regulären Prototypenmontage hat es sich im untersuchten Unternehmen etabliert, über den Verlauf eines Fahrzeugprojekts mehrmals Workshops zur gezielten Absicherung mit physischen Fahrzeugprototypen durchzuführen. Dabei werden die Fahrzeuge im Beisein von Montage-, Logistik- und Betriebsmittelplanern, Entwicklern sowie Experten für Arbeitsergonomie und Zeitwirtschaft über mehrere Wochen hinweg Schritt für Schritt aufgebaut und die Montageprozesse auf Basis eines vordefinierten Fragenkataloges bewertet. Dieser Katalog umfasst ca. 30 Fragen aus den Kategorien Montierbarkeit, Fehlhandlungssicherheit, Ergonomie, Betriebsmittel und Ergonomie sowie Effizienzaspekte. Hinsichtlich der Montagefunktionen decken die Fragen das Aufnehmen, Ausrichten und Verbinden ab, wobei je Montageschritt nur die jeweils relevanten Funktionen bewertet werden.

Art, Umfang, Fokus und Betrachtungstiefe der Workshops werden in Abhängigkeit von Neuheitsgrad der Produkt- und Produktionskonzepte individuell an das Fahrzeugprojekt angepasst. Bei dem im Rahmen der Fallstudie begleiteten Projekt wurden drei Absicherungsworkshops mit physischen Aufbauten in der Prototypen- und Vorserienphase durchgeführt. Ihre zeitliche Einordnung in den Produktentwicklungsprozess ist in **Abbildung 21** dargestellt. Vor der Beschaffung der Prototypenkomponenten wurde die geometrische Konsistenz des Produktkonzepts und die Stimmigkeit der Fügekonzepte im Rahmen eines Workshops auf Basis digitaler 3D-Modelle (1) überprüft.

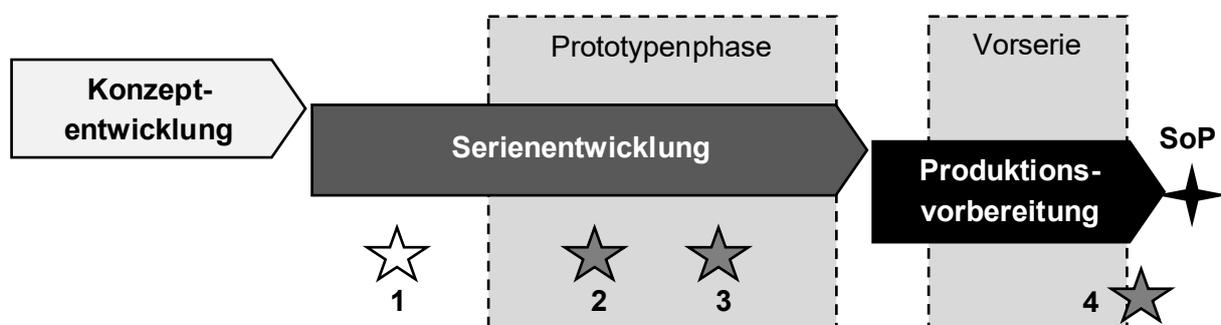


Abbildung 21: Absicherungsworkshops im Produktentwicklungsprozess

Die Workshops 2 und 3 wurden im Rahmen dieser Arbeit durch den Autor begleitet. Der erste der beiden fand in einer regulären Werkstattumgebung des Entwicklungszentrums statt. Der Fokus der Evaluierung in dieser Phase der Serienentwicklung liegt auf der Erfassung von aus Sicht der Montage ungünstigen Aspekten der Produktgestaltung, der vollständigen Definition und Dokumentation der wertschöpfenden Montagetätigkeiten sowie der Festlegung ihrer groben Abfolge.

Einige Monate später wurde dann der zweite Workshop in einem seriennahen Umfeld durchgeführt. Für derartige Erprobungen verfügt das Prototypenwerk über einen separaten Bereich, der mit Fördertechnik und Betriebsmitteln wie sie in der Serie eingesetzt werden, ausgestattet ist. In diesem Umfeld können die geplanten Arbeitsplätze detailliert abgebildet werden, was beispielsweise eine realistische Bewertung der Taktzeiten unter Berücksichtigung von Zusatztätigkeiten (z.B. Wege, Logistik, Bereitstellung) ermöglicht, jedoch auch mit entsprechendem Vorbereitungsaufwand verbunden ist. Entsprechend liegt der Schwerpunkt dieses Workshopformats weniger auf einer vollständigen Betrachtung aller Montageabläufe. Vielmehr besteht das Ziel darin, im Vorfeld als kritisch identifizierte Arbeitsschritte detailliert zu untersuchen, neuartige Verfahren zu optimieren und Sonderbetriebsmittel wie beispielsweise Aufnahme- und Handlingsgeräte zu erproben.

Für einige Umfänge, die erfahrungsgemäß Schwierigkeiten verursachen, werden zudem im Rahmen der regulären Prototypenproduktion gezielte Evaluierungen durchgeführt. Beispielsweise wird im Rahmen des „Schraubenchecks“ für alle sicherheitskritischen Verschraubungen die Plausibilität und Korrektheit der Schraubparameter und die Eignung der geplanten Schraubwerkzeuge geprüft. Der „Steckercheck“ dient analog dazu der Überprüfung der elektrischen Steckverbindungen. Hier liegt der Fokus primär auf der Fehlhandlungssicherheit (Codierung der Verbinder, haptisches Feedback bei korrekter Verrastung) sowie der Optimierung von Leitungslängen und Halterungen. Diese Prüfungen sind jedoch weder verbindlich noch standardisiert, ihre Durchführung obliegt dem jeweiligen Montageplaner.

Die Vor- und Nachbereitung sowie die Durchführung der Workshops stellen einen beträchtlichen personellen und zeitlichen Aufwand dar und binden Ressourcen über lange Zeiträume. Die Qualität der Vorbereitung, die Effizienz der Durchführung und letztlich die Qualität der Ergebnisse hängen dabei maßgeblich von den individuellen Fähigkeiten und der Erfahrung der beteiligten Personen ab. Da für die Absicherungsworkshops nur ein Versuchsfahrzeug mit einer bestimmten Konfiguration zur Verfügung steht, können zahlreiche andere Varianten mit abweichender Ausstattung, anderen Komponenten und entsprechend abweichenden Montageabläufen nicht bewertet werden.

Die entdeckten Defizite werden oftmals unzureichend dokumentiert, was die Lösung erschwert und zusätzlichen Kommunikationsaufwand verursacht. Da die Erkenntnisse recht spät in den Entwicklungsprozess einfließen, lassen sich Optimierungen zudem häufig nicht mehr wirtschaftlich umsetzen. In Summe ist davon auszugehen, dass bei dieser Vorgehensweise trotz hohem Ressourcenaufwand ein erhebliches Potenzial zur Optimierung des Produkts und des Montagesystems und damit zur Vorbereitung eines reibungslosen Serienanlaufs nicht genutzt wird.

3.1.3 Diskussion und Bewertung

Die in Kapitel 3.1.1 aus der Literatur abgeleiteten Problemhypothesen lassen sich auf Basis der Fallstudie wie folgt bewerten und ergänzen:

- D1) Die Absicherung des geplanten Produktionssystems folgt keiner systematischen Vorgehensweise, vielmehr erfolgt sie erfahrungsbasiert und situativ.

Im untersuchten Unternehmen existiert zwar ein generisches Vorgehensmodell für die Validierung des geplanten Montagesystems, das zu gewissen Meilensteinen Absicherungsworkshops vorsieht und auch eine Bewertungsmethode für manuelle Montageabläufe umfasst. Eine umfassende, verbindliche Methodik die eine systematische Bewertung aller relevanten Aspekte bei allen relevanten Prozessen sicherstellt ist jedoch nicht etabliert und es existieren keine Werkzeuge, welche die effiziente Durchführung, Dokumentation und Kommunikation unterstützen. Die Prototypenmontage stellt basierend auf der Anzahl der dort festgestellten Unzulänglichkeiten zwar einen wichtigen Sensor für Defizite hinsichtlich der Montierbarkeit dar, ihre Rolle bei der Absicherung ist jedoch nicht klar definiert. Eine systematische Evaluierung erfolgt nicht und es besteht keine Transparenz hinsichtlich der Testabdeckung. Generell sind Umfang und Qualität der Absicherung stark von den jeweils beteiligten Personen abhängig. Somit decken sich die Beschreibungen der Literatur in diesem Punkt mit den Beobachtungen der Fallstudie.

- D2) Zergliederte Zuständigkeiten und Kompetenzen führen zu einem Mangel an Transparenz, unzureichender Testabdeckung und hohem Kommunikationsaufwand.

Auch diese Hypothese kann auf Basis der Fallstudie bestätigt werden. Insbesondere die kleinteiligen Umfänge in der Montageplanung, deren Struktur sich am Produkt und nicht der Montagelogik orientiert, sowie die Trennung in Konzept- und Realisierungsplanung bereiten in dieser Hinsicht Probleme. Zwischen den zahlreichen unterschiedlichen Stellen, die in die Absicherung des Montagesystems involviert sind, herrscht ein hoher Abstimmungsbedarf. Die Zuständigkeiten sind häufig unklar. Mangels Transparenz und durchgängiger Datenverfügbarkeit ist es unmöglich zu einem bestimmten Zeitpunkt der Entwicklung des Montagesystems eine valide Aussage hinsichtlich des Absicherungsgrads und der Reife zu treffen.

- D3) Daten und Informationen sind nicht durchgängig verfügbar, Abläufe werden nicht systematisch durch Informationssysteme unterstützt.

Der Mangel an aktuellen, vollständigen und korrekten Informationen konnte auch in der Fallstudie als wesentliches Hindernis bei der Absicherung der geplanten Produktionsabläufe identifiziert werden. Im Prototypenbau führt der Informationsmangel regelmäßig zu Fehlern und Verzögerungen. Die unzureichende Informationsqualität bei der Meldung von Defiziten erschwert den Problemlösungsprozess und verursacht durch Rückfragen zusätzlichen Kommunikationsaufwand. Während in den jeweiligen Fachabteilungen zwar teilweise spezialisierte IT-Systeme vorhanden sind, mangelt es an Schnittstellen und Vernetzung, um eine effiziente Nutzung der vorhandenen Daten zu ermöglichen.

- D4) Die Reifegradmessung im Stage-Gate Prozess stellt aufgrund fehlender Daten und objektiver Bewertungsmodelle eine Herausforderung dar.

Eine objektive Bewertung der Reife scheint mit den in der Literatur beschriebenen und auch der in der Praxis beobachteten Vorgehensweisen kaum möglich. Im betrachteten Unternehmen werden stattdessen durch einen generischen Entwicklungsplan Meilensteine sowie zu erreichende Ergebnisse zeitlich vorgegeben und deren Erfüllung angenommen soweit keine offensichtlichen Abweichungen vorliegen, anstelle den tatsächlichen Entwicklungsfortschritt zu messen.

- D5) Defizite im Problem- und Änderungsmanagement (nachhaltige Fehlerbehebung) und bei den Lernprozessen führen zu Verzögerungen, vermeidbaren technischen Änderungen, hohem Kommunikationsaufwand und Verlusten beim Wissenstransfer.

Auch dieses Phänomen konnte in dem untersuchten Beispiel aus der industriellen Praxis beobachtet werden. So verfehlten Lösungen aus Konstruktion und Planung oftmals die gewünschte Wirkung, da die Problemursachen unzureichend verstanden wurden oder die vorgeschlagenen Lösungen neue Probleme verursachten. Dadurch waren oftmals mehrere Änderungsschleifen erforderlich, die sich aufgrund der ineffizienten Kommunikation jeweils zeitintensiv gestalteten.

- D6) Die Abbildung von kurzfristigen Produktkonzeptänderungen bei Hardware-Prototypen stellt aufgrund der Verfügbarkeit entsprechend angepasster Teile und inkonsistenter Entwicklungsstände eine Herausforderung dar.

Insbesondere aufgrund der langen Vorlaufzeiten und hohen Kosten für die Beschaffung der Prototypenbauteile stellen kurzfristige Produktänderungen im Prototypenbau ein Problem dar. In der Praxis werden in dieser fortgeschrittenen Entwicklungsphase jedoch viele Konstruktionsumfänge eher evolutionär weiterentwickelt als revolutionär neu erfunden oder umfassend umgestaltet, wodurch sich die Problematik in Grenzen hält. Kleinere Anpassungen an den Komponenten, wie Beschnitt oder zusätzliche Bohrungen lassen sich teilweise vor Ort im Prototypenbau umsetzen und neuartige Verfahren wie die Additive Fertigung erlauben auch die Herstellung vollständig neuer Bauteile in kurzer Zeit. Dennoch können sich Ersatzmaterialien, händische Anpassungen oder auch behelfsmäßige Verbindungen aufgrund inkonsistenter Fügekonzepte nachteilig auf die Validität der Versuche auswirken, die mit den Prototypen durchgeführt werden. Zudem verursachen diese, von der Serie abweichenden Prozesse häufig Störungen in der Prototypenmontage und erschweren die Montageprozessabsicherung. Durch eine umfassendere virtuelle Absicherung im Vorfeld des physischen Prototypenbaus und eine stärkere Nutzung von Baukastenlösungen versucht man derzeit die Anzahl später Produktänderungen zu minimieren, wodurch diese Problematik etwas entschärft und die Qualität der Hardwareprototypen gesteigert werden kann.

Des Weiteren hat die Fallstudie gezeigt, dass die Defizite bei der Informationsverwaltung und -bereitstellung neben ihren negativen Auswirkungen auf die Absicherung des Produktionssystems und das Änderungsmanagement auch unmittelbar bei der Prototypenmontage selbst zu geringer Effizienz und vermeidbaren Verzögerungen führen. Es ist daher anzunehmen, dass sich Optimierungen bei den Informationsflüssen in mehrerlei Hinsicht positiv auswirken. Der Informationsbereitstellung und -erfassung in der Prototypenmontage soll aus diesem Grund in der vorliegenden Arbeit besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

3.2 Strukturierte Literaturrecherche zum Stand der Wissenschaft

Die Defizite bei der Absicherung des Montagesystems und der Produktion physischer Prototypen in der industriellen Praxis wurden im vorhergehenden Abschnitt sowohl anhand der wissenschaftlichen Literatur als auch im Rahmen einer Fallstudie ausführlich beleuchtet. In diesem Kapitel wird nun mittels einer strukturierten Literaturrecherche untersucht, welche Lösungsansätze für die identifizierten Herausforderungen existieren, um den Stand der Wissenschaft zu charakterisieren. Darauf aufbauend wird anschließend das Forschungsziel der vorliegenden Arbeit detailliert.

3.2.1 Methodik und Durchführung

Die Wichtigkeit einer systematischen Vorgehensweise und umfassenden Dokumentation bei der Literaturrecherche wird beispielsweise in [65] dargelegt. Eine sorgfältige Analyse und Zusammenfassung der existierenden Wissensbasis stellt die Voraussetzung für die effektive Nutzung dieser und die Vermeidung redundanter Forschungsarbeit dar. Eine präzise Beschreibung der Vorgehensweise ermöglicht es dem Leser, die Gründlichkeit und den Grad der Vollständigkeit der Untersuchung zu beurteilen, was wiederum die Weiterverwendung der Ergebnisse erlaubt. Daher schlagen *vom Brocke et al.* einen vierstufigen Prozess für die Literaturrecherche vor, der schließlich in der Identifikation von Forschungslücken und der Definition einer Forschungsagenda mündet (vgl. **Abbildung 22**). Dieser Prozess diente in der vorliegenden Arbeit als Orientierung.

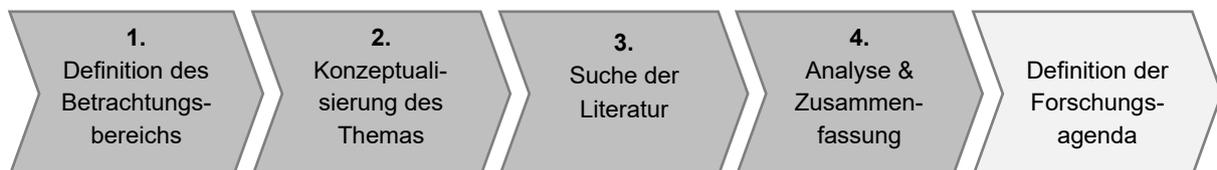


Abbildung 22: Methodik der Literaturrecherche nach vom Brocke et al. [i.A.a. 65, S. 2212]

In der ersten Phase wird auf Basis der Zielsetzung zunächst der Betrachtungsbereich thematisch, wie auch zeitlich und bezüglich der berücksichtigten Quellen definiert. In Vorbereitung auf die eigentliche Suche nach relevanter Literatur sind in der zweiten Phase zentrale Konzepte und Schlüsselbegriffe der ausgewählten Themenkomplexe zu identifizieren. Die Sammlung von Synonymen sowie Ober- und Unterbegriffen erweitert die Menge der Stichwörter. In der dritten Phase werden die Stichwörter schließlich zu Suchtermen kombiniert und die eigentliche Suche in den Literaturdatenbanken durchgeführt. Auf Basis einer ersten Sichtung werden alle möglicherweise relevanten Beiträge dokumentiert. Die Kategorisierung der Suchergebnisse sowie die Analyse und Zusammenfassung der relevanten Inhalte in der vierten Phase stellt schließlich den Stand der Wissenschaft dar und bildet die Grundlage für die Identifikation von Forschungsmöglichkeiten.

Das Ziel der Literaturrecherche besteht im Rahmen dieser Arbeit darin, den Stand der Wissenschaft im skizzierten Themenbereich repräsentativ darzustellen und aktuelle Forschungs-

schwerpunkte zu erfassen. Einerseits sollen bestehende Ansätze und Methoden für die Absicherung von Serienmontageprozessen während der Prototypen- und Vorserienproduktion sowie die Bewertung ihrer Reife identifiziert werden. Andererseits sollen Konzepte für Informationssysteme untersucht werden, die geeignet sind, die Arbeit auf dem Shopfloor, die Montageprozessabsicherung und die Kommunikation zwischen Prototypenbau, Planung und Entwicklung zu optimieren. Aufgrund der Fokussierung auf den, sich rapide fortentwickelnden Bereich der Informationssysteme wurde der zeitliche Rahmen auf Beiträge seit 2010 festgelegt. Sowohl Artikel aus wissenschaftlichen Fachzeitschriften wie auch Konferenzbeiträge in deutscher und englischer Sprache wurden berücksichtigt, allerdings lediglich Arbeiten, die einem Peer-Review unterzogen wurden, sowie Dissertationen.

Als Quelle dienten ausschließlich digitale Literaturdatenbanken, die eine Suche in Titel, Abstract sowie den Schlüsselwörtern erlauben und für die Suche frei zugänglich sind. Hinsichtlich des Themengebiets wurden keine Einschränkungen angewendet. Die genutzten Datenbanken sind in **Tabelle 7** aufgelistet. Die initiale Suche erfolgte im Zeitraum Oktober 2019 bis Januar 2020. Im August 2021 wurden die Ergebnisse durch eine erneute Suche aktualisiert.

| Datenbank | Verlag / Herausgeber |
|--|---|
| ACM Digital Library | Association for Computing Machinery ACM Inc., New York, USA |
| Directory of Open Access Journals (DOAJ) | Infrastructure Services for Open Access C.I.C. (IS4OA), UK |
| Emerald Insight | Emerald Publishing Limited, Bingley, UK |
| IEEE Explore | Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), New York, USA |
| ScienceDirect | Elsevier B.V., Amsterdam, Niederlande |

Tabelle 7: Für Recherche in dieser Arbeit genutzte Literaturdatenbanken

Die Recherche erfolgte in zwei thematischen Blöcken, für die zunächst relevante Begrifflichkeiten und ihre englischen Entsprechungen gesammelt wurden. Diese wurden über mehrere Suchvorgänge und Sichtung der Ergebnisse hinweg iterativ angepasst und erweitert. Im ersten Themenkomplex wurden Beiträge gesucht, die sich mit der Entwicklung und Validierung des Montagesystems während der Serienentwicklung befassen. Die für die Suche genutzten Schlagworte sind in **Tabelle 8** aufgeführt. Anschließend wurde nach Literatur gesucht, die die Gestaltung und Anwendung von Informations- und Assistenzsystemen für die manuelle Montage thematisiert. Besonderer Fokus lag dabei auf Ansätzen für ihre Nutzung im Vorserienumfeld. **Tabelle 9** listet die hierfür genutzten Suchbegriffe auf.

Um möglichst relevante Ergebnisse zu erhalten, wurden zunächst die Hauptbegriffe mittels logischer UND-Verknüpfung gesucht. Anschließend wurde der Suchterm durch die Synonyme, Ober- und Unterbegriffe per ODER-Verknüpfung erweitert, bis die Anzahl der Ergebnisse je

Suche 200 übertraf. Auf Basis von Titel und Zusammenfassung erfolgte anschließend eine Vorauswahl relevanter Beiträge.

| | | | | |
|-----------------------|---|---|--|---------------------------------------|
| Hauptbegriffe | Montagesystem <i>assembly system</i> | Validierung <i>validation</i> | Serienentwicklung <i>series development</i> | automobil <i>automotive</i> |
| Synonyme | | Absicherung, Erprobung, Test <i>test, trial</i> | | Auto <i>car</i> |
| Oberbegriffe | Montage, Produktion, <i>assembly,</i> <i>production,</i> <i>manufacturing</i> | Vorbereitung, Optimierung, <i>perparation,</i> <i>optimization</i> | Produkt- entwicklung <i>product</i> <i>development</i> | Fahrzeug <i>vehicle</i> |
| Unterbegriffe | Montageprozess <i>assembly process</i> | | Vorserie, Prototy- penbau <i>pre-series,</i> <i>prototyping</i> | PKW <i>passenger</i> <i>car</i> |
| Verwandte Begriffe | | Reife, <i>maturity</i> | Anlauf, Hochlauf <i>Ramp-up</i> | |

Tabelle 8: Begriffe des ersten Themenbereichs

| | | | | |
|-----------------------|---|---|--|---|
| Hauptbegriffe | Montage <i>assembly</i> | Information <i>information</i> | System <i>system</i> | Vorserie <i>pre-series,</i> |
| Synonyme | | | Software <i>Software</i> | |
| Oberbegriffe | Produktion, <i>production,</i> <i>manufacturing</i> | | | Serien- entwicklung <i>series</i> <i>development</i> |
| Unterbegriffe | Manuelle Montage <i>manual</i> <i>assembly</i> | Assistenz, Anweisung <i>instruction,</i> <i>assistance</i> | cyber-physi- sches System <i>cyber-physical</i> <i>system</i> | Prototypenbau <i>prototyping</i> |
| Verwandte Begriffe | Werker <i>worker, staff</i> | Unterstützung <i>guidance,</i> <i>support</i> | | Einzelfertigung <i>single-piece</i> <i>production</i> |

Tabelle 9: Begriffe des zweiten Themenbereichs

Von etwa 1.200 Ergebnissen aus 41 Suchvorgängen wurden dabei 130 Beiträge auf Basis von Titel und Abstract für eine eingehende Betrachtung ausgewählt, in deren Rahmen auch eine

Rückwärtssuche ohne zeitliche Einschränkung vorgenommen wurde. In Summe konnten somit 173 relevante Publikationen identifiziert werden (siehe Anhang B). Arbeiten, die sich rein auf virtuelle Simulations- und Absicherungsmethoden konzentrieren sowie Veröffentlichungen aus dem Bereich der Robotik wurden bei der anschließenden Analyse ausgeschlossen. Die Ergebnisse der Recherche werden im folgenden Abschnitt vorgestellt und diskutiert.

3.2.2 Diskussion der Ergebnisse

Die als für diese Arbeit relevant identifizierte Literatur aus den beiden Themenbereichen wurde im nächsten Schritt anhand ihrer thematischen Fokussierung kategorisiert. Dabei wurden iterativ Kategorien und Themencluster gebildet und jeder Beitrag anhand seines thematischen Schwerpunktes mindestens einer und maximal drei Kategorien zugeordnet. Es sei angemerkt, dass die folgenden Darstellungen aufgrund des limitierten Umfangs der vorliegenden Literaturrecherche kein vollständiges Bild der Forschungstätigkeit in den betrachteten Feldern geben können. Vielmehr sollen sie einen groben Überblick zum Stand der Wissenschaft vermitteln sowie dominante Themen und Forschungsschwerpunkte aufzeigen.

3.2.2.1 Absicherung und Optimierung von Montageprozessen, Messung ihrer Reife und Wissenstransfer in die Serie

Die Cluster des ersten Themenbereichs *Evaluation und Absicherung* sind in **Abbildung 23** dargestellt (Kategorien eines Clusters farblich gekennzeichnet). Die Zahl der Beiträge, die der jeweiligen Kategorie zugerechnet wurden, ist in Klammern angegeben.

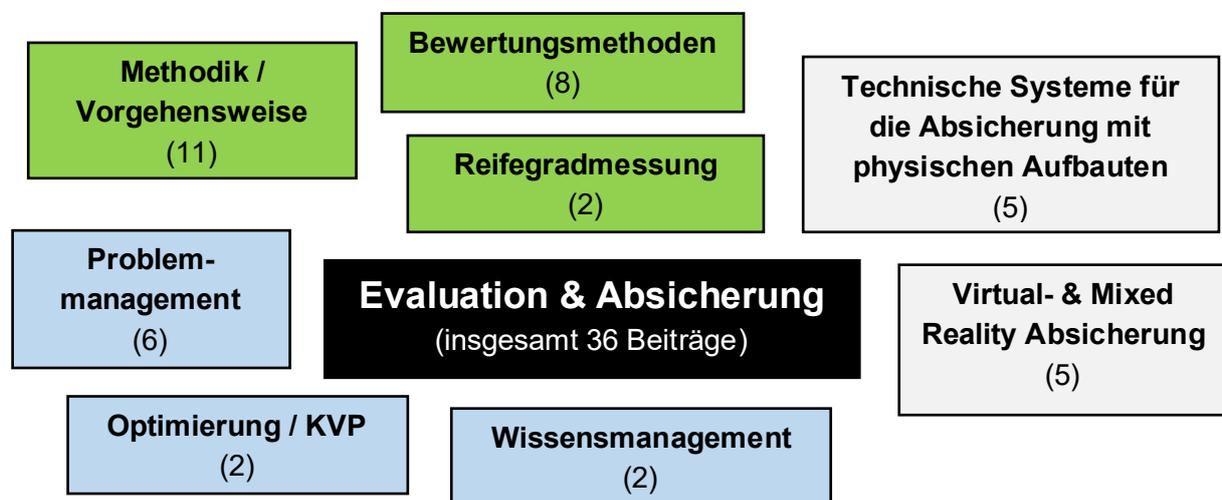


Abbildung 23: Cluster im Themenbereich *Evaluation und Absicherung* (mit Anzahl der der jeweiligen Kategorie zugerechneten Beiträge)

Der größte Teil der Publikationen des Themenbereichs *Evaluation und Absicherung* befasst sich mit Absicherungsstrategien, Vorgehensweisen und Methoden für die Bewertung des Entwicklungsstands (Cluster 1 - grün), wobei lediglich zwei Beiträge konkret die Messung des Entwicklungsfortschritts mittels eines Reifegradmodells thematisieren. Ausführlich diskutiert wird in der Literatur der Einsatz von virtuellen Validierungsmethoden (wobei diese nicht den Fokus der vorliegenden Arbeit bilden und daher nur am Rande betrachtet wurden) sowie

Mixed-Reality, auch Beispiele für die technische Unterstützung der Absicherung mit physischen Aufbauten lassen sich finden (Cluster 2 - grau). An die eigentliche Evaluation angrenzende Themen wie das Problemmanagement, Optimierungsmethoden (insbesondere der kontinuierliche Verbesserungsprozess KVP nach der Lean-Philosophie) und betriebliche Lernprozesse sowie das Wissensmanagement bzw. der Wissenstransfer aus der Entwicklung in die Produktion bilden das dritte Themencluster (Cluster 3 - blau).

Cluster 1: Absicherungsstrategien, Vorgehensweisen und Methoden

Die Validierung als kontinuierlicher Abgleich zwischen den Zielen und dem jeweils erreichten Entwicklungsstand untersteht, wie auch alle anderen Aktivitäten der Serienentwicklung, Zeit- und Kostenrestriktionen. Daher kann nicht beliebig aufwendig bzw. umfänglich validiert werden, eine effektive und zugleich effiziente Absicherung der wesentlichen Aspekte des Entwicklungsgegenstandes muss angestrebt werden [18]. Unter dieser Prämisse muss eine Absicherungsstrategie einerseits Absicherungsmethoden und -Maßnahmen definieren, aber auch deren zeitliche Verortung in der Serienentwicklung sowie ihre thematische Fokussierung und ihren Betrachtungsumfang festlegen. *Hesse und Weber* weisen darauf hin, dass bei der Wahl von Absicherungsmethoden die möglichst akkurate Abbildung der Produkt- und Prozesseigenschaften zum Stand des SoP anzustreben ist, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen [14, S. 932]. Aufwand und Kosten für die Durchführung der jeweiligen Methode sind diesem Ziel gegenüberzustellen. Des Weiteren spielen bei der Auswahl von Methoden für eine Absicherungsstrategie auch Faktoren wie beispielsweise der erzielbare Abdeckungsgrad (Produkt- und Prozessvarianten), die rechtzeitige Verfügbarkeit der Ergebnisse im Entwicklungsprozess oder die Wahrscheinlichkeit von Änderungen nach bereits erfolgter Absicherung (welche die Validität der Absicherungsergebnisse reduzieren und ggf. eine erneute Evaluation erforderlich machen) eine wesentliche Rolle.

Absicherungsmaßnahmen lassen sich anhand des jeweils genutzten Betrachtungsgegenstands unterscheiden. Bei der virtuellen Absicherung oder Simulation findet die Analyse auf Basis von Computermodellen (i.d.R. 3D-CAD Modelle) des Produkts, der Werkzeuge und Anlagen sowie des Produktionsumfelds und teilweise auch des Menschen statt. Der wesentliche Vorteil dieser Methoden liegt darin, dass sie ohne kostspielige und zeitaufwändige Hardwareaufbauten auskommen und sich schneller anpassen lassen. Daher werden sie besonders in frühen Phasen intensiv eingesetzt. *Winkes und Aurich* beschrieben beispielsweise eine Methodik für die Anwendung von *virtual-reality* (VR) in frühen Phasen der Montageplanung, in denen noch keine Hardware bzw. physische Umgebung für eine Erprobung zur Verfügung steht [66]. Jedoch können virtuelle Methoden auch in späteren Phasen oder während der bereits laufenden Serienproduktion eingesetzt werden, beispielsweise wenn im Rahmen von Volumen Anpassungen verschiedene Szenarien für die Umplanung der Montage bewertet werden sollen ohne die laufende Produktion zu stören [67]. Zu den Nachteilen virtueller Absicherungsmethoden zählen die oftmals aufwändige Datenaufbereitung (sofern die erforderlichen Daten überhaupt verfügbar sind) und in der virtuellen Welt nicht bzw. nur schlecht darstellbare Aspekte. *Seth et al.* [68] geben einen umfassenden Überblick zu den Hintergründen, Herausforderungen und verschiedenen Ansätzen bei der virtuellen Bewertung von Montagesituation. Wenngleich die Technik seit ihrer Untersuchung stark weiterentwickelt wurde, sind viele der von ihnen beschriebenen Schwierigkeiten, insbesondere die komplexe und aufwändige

Datenaufbereitung, das Fehlen haptischer Interaktion und die Abbildung des Verhaltens flexibler Materialien nicht praxistauglich gelöst.

Für die Absicherung von Montageprozessen werden daher neben rein virtuellen Methoden auch zunehmend hybride Ansätze erforscht, die danach streben die Vorteile der virtuellen und der realen Welt zu verbinden. Dazu zählen beispielsweise *augmented-reality* (AR) Technologien, die genutzt werden können, um computergenerierte Modelle in ein bestehendes physisches Umfeld (beispielsweise eine Fahrzeugkarosserie) einzubetten. Einfache physische Mock-Ups können virtuelle Darstellungen ergänzen, um Interaktion zu ermöglichen und haptische Aspekte zu integrieren. Die Evaluation von Bedienkonzepten und -elementen stellt einen beliebten Anwendungsfall für solche Ansätze dar, wie *Bordegoni et al.* erläutern [69]. Um durch virtuelle Montageumgebungen zu navigieren, Montagetätigkeiten zu trainieren und Bewegungsabläufe in Simulationen realistischer modellieren zu können, beschreiben *Bönig et al.* ein Konzept für die Nutzung laserbasierter Bewegungserkennung (*motion-capturing*) [70].

Wie bereits geschildert, sind physische Aufbauten und Erprobungsfahrzeuge für die Absicherung und Validierung der Simulationsergebnisse derzeit noch unverzichtbar. Wenngleich aufgrund des Potenzials zur Kosteneinsparung und Verkürzung des PEP intensiv an ihrer Reduzierung gearbeitet wird, scheint ein vollständiger Ersatz durch virtuelle Methoden aktuell nicht realistisch. Dabei kommen im Verlauf des PEP verschiedenste Arten physischer Aufbauten zum Einsatz. Während in der frühen Konzeptphase funktionslose Lehm- und Designmodelle zur Bewertung ästhetischer und geometrischer Aspekte genutzt werden, verwenden Entwickler und Konstrukteure in Laboraufbauten (eingeschränkt) funktionsfähige Module fernab der Gestalt des späteren Produkts zum Test der Subfunktionen und der Systemintegration. Mit fortschreitender Entwicklung nähern sich die Aufbauten über Modulträger, seriennahe Gesamtfahrzeugprototypen und Null- sowie Vorserie dem späteren Endprodukt an. In der Forschung werden physische Prototypen primär im Bereich des *rapid-prototyping* (RP) mittels additiver Fertigungsverfahren diskutiert. Den Einsatz von RP-Modellen für die Validierung und das Training von Montageprozessen diskutieren beispielsweise *Ahmad et al.* [71].

In der Praxis werden bei Fahrzeugprojekten heute sowohl zur Absicherung der Produkteigenschaften wie auch für die Sicherstellung der Herstellbarkeit und die Evaluation der Produktionskonzepte sowohl virtuelle wie auch hybride und klassische, hardwarebasierte Methoden eingesetzt. Für verschiedene Absicherungszielsetzungen eignen sich die Methoden nicht gleichermaßen, gewisse Voraussetzungen liegen erst in späteren Entwicklungsphasen vor. Entwicklungstätigkeiten bauen auf den Absicherungsergebnissen vorheriger Phasen auf. Dadurch ergibt sich in gewissem Maße ein sequentielles Vorgehen. Die Absicherungsstrategie muss das Potenzial der jeweiligen Methoden unter Berücksichtigung ihrer Einschränkungen, Abhängigkeiten, Anforderungen und dem jeweiligen Aufwand möglichst optimal kombinieren.

Im theoretischen Idealfall führt die Absicherung eines Entwicklungsstands zur Erkennung aller vorhandenen Probleme und Defizite. In der Realität ist hingegen aufgrund der angesprochenen Restriktionen stets von unerkannten Unzulänglichkeiten auszugehen. *Hesse und Weber* schlagen daher vor, den Anteil unerkannter, also erst in späteren Phasen bzw. zum oder nach SoP identifizierter Probleme als Maß für die Qualität einer Absicherungsmethode heranzuziehen [14, S. 934]. Sie erläutern diese Herangehensweise anhand einer ex-post Betrachtung

eines Industrieprojekts. Dabei zeigt sich, dass eine präzise Beurteilung einerseits aufgrund der erforderlichen Datenqualität und andererseits aufgrund der zeitlichen Überlappung verschiedener Absicherungsaktivitäten innerhalb des PEP kaum möglich ist. Auch die Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Absicherungsstrategien über unterschiedliche Projekte hinweg scheint aufgrund der vielfältigen externen Einflussfaktoren zweifelhaft. Reife definieren Sie in ihrer Analyse als den Grad der Erfüllung bestimmter Anforderungen. Während Anforderungen an das Produkt meist präzise definiert sind besteht im Hinblick auf die Bewertung des geplanten Montagesystems und der Montageabläufe dabei jedoch die Problematik, dass die Anforderungen hier nicht vollständig bekannt bzw. definiert und formalisiert sind. In der Praxis rücken sie oftmals erst durch ihre Nichterfüllung sowie die daraus resultierenden Probleme in den Fokus.

Wenngleich eine präzise Definition des Begriffs Reife im Kontext der Absicherung fehlt, wird eine frühzeitige und schnelle Reifesteigerung in der Literatur häufig als Ziel einer optimierten Absicherungsstrategie angeführt. In seiner Dissertation [58] widmet sich M. Müller der produktionsbezogenen Produktabsicherung, entwirft ein domänenübergreifendes Reifegradmodell und definiert Anforderungen an IT-Systeme die den Absicherungsprozess unterstützen sollen (er spricht dabei von einem *Engineering Information Management System*, EIMS). Dabei diskutiert er ausführlich die Nutzung eines domänenunabhängigen, digitalen und realen Reifegrads (vgl. **Abbildung 24**), jedoch ohne darzulegen wie die Reifemessung in der Praxis konkret erfolgen kann. Stattdessen beschränkt sich die vorgeschlagene Vorgehensweise darauf, den einzelnen Absicherungsmethoden mittels steckbriefartiger Beschreibung jeweils theoretisch erzielbare Ergebnisse und damit idealisierte Reifegradsteigerungen zuzuschreiben. Als Zielsetzung formuliert er eine frühzeitige Entdeckung von Defiziten (er spricht von Vorfällen), da nach seinem Modell die Anzahl dieser mit der Reife korreliert.

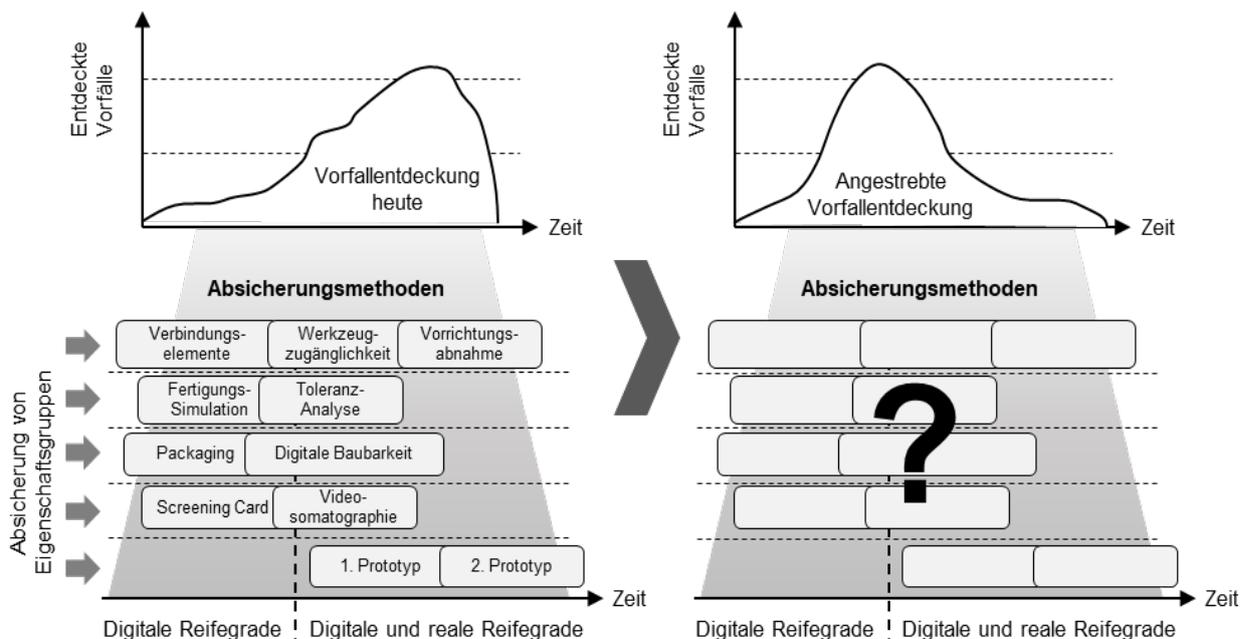


Abbildung 24: Frühzeitige Entdeckung von Defiziten als Maß für die Steigerung des Reifegrads und Zielsetzung bei der Optimierung der Absicherungsstrategie [58; 72]

Im Hinblick auf die Planung und Durchführung der Absicherung während der Serienentwicklung lassen sich zwar einige Beiträge aus der industriellen Praxis finden (z.B. [55; 73; 74]), die insbesondere in Bezug auf den zunehmenden Einsatz virtueller Methoden und mit starkem Fokus auf die Produkteigenschaften einen Einblick in die Vorgehensweisen verschiedener Unternehmen gewähren. Eine umfassende wissenschaftliche Betrachtung mit Fokus auf die Montage sowie eine fundierte Methodik zur Bewertung der geplanten Montageprozesse lässt sich in der untersuchten Literatur jedoch nicht identifizieren. *Wöhlke und Schiller* verfolgen mit ihrer Vorgehensweise für die Planungsabsicherung ebenfalls das Ziel einer frühzeitigen Reifegradsteigerung [72]. Sie beschreiben ein sequentiell-iteratives Vorgehen, bei dem zunächst eine zunehmend detaillierte produktorientierte Bewertung vorgenommen wird, an die sich dann eine prozessorientierte Betrachtung anschließt, wobei insbesondere letztere iterativ durchlaufen wird, um verschiedene Alternativen zu prüfen. In ihrer Methodik berücksichtigen sie jedoch ausschließlich virtuelle Methoden und gehen auch nicht weiter auf die Bestimmung des Reifegrades sowie die zeitliche Verortung der Absicherungsmaßnahmen im PEP ein.

Ein stärkerer Fokus wurde in der Forschung auf die sich an die Serienentwicklung und Vorserie anschließende Phase des *ramp-ups* gelegt. Beispielsweise liefern *Dyckhoff et al.* [75] eine ausführliche theoretische Betrachtung des Serienanlaufs aus betriebswirtschaftlicher Sicht, bei der sie insbesondere Lerneffekte und die Erfahrung des Montagepersonals betrachten. Reife und Qualität der Montageprozesse sowie Art und Umfang der vorgelagerten Absicherung finden in ihrer Modellierung der Wirkzusammenhänge jedoch keine Berücksichtigung. *Terwiesch und Bohn* analysieren in [62] den Zielkonflikt (*trade-off*) zwischen einer schnellen Steigerung der Stückzahlen, der Minimierung von Fehlern bzw. Ausschuss und systematischen, ausführlichen Erprobungen bzw. Optimierungen. Ihre Überlegungen lassen sich auch auf die vorgelagerte Produktion der physischen Fahrzeugprototypen übertragen, wo die schnelle Bereitstellung erprobungstauglicher Prototypen ebenfalls einen Zielkonflikt zur ausführlichen Absicherung der Produktionsprozesse darstellt. Auf Basis eines analytischen Modells des Produktionsanlaufs plädieren sie dafür, trotz des externen Drucks zur schnellen Steigerung der Stückzahlen in der frühen Phase eines Anlaufs auf Abkürzungen zu verzichten und eine umfassende, valide Absicherung zu priorisieren um, spätere Probleme mit hohem Schadenspotenzial zu vermeiden. Die Komplexität eines Montagesystems wird allgemein als ein wesentlicher Verursacher von Anlaufproblemen gesehen. Die Beherrschung der Komplexität stellt insbesondere bei der Produktion mehrerer Modelle auf einer Montagelinie (MMAL) eine Herausforderung dar. Es wird daher in der Literatur zu Anlaufstrategien oftmals empfohlen die Komplexität insbesondere in der instabilen *ramp-up* Phase möglichst niedrig zu halten, beispielsweise in dem die Serienproduktion mit reduzierter Varianz beginnt. Eine umfassende Analyse der Komplexitätstreiber liefern *Schuh et al.* [76], *Hu et al.* [9] formulieren ein mathematisches Modell der Zusammenhänge.

Aus den Herausforderungen der Anlaufphase leiten einige Forscher wiederum Optimierungsvorschläge für die Montageplanung ab. Um die Komplexität einer Montagelinie bereits in der Planungsphase beurteilen zu können, schlagen *Guoliang et al.* ein mathematisches Bewertungsmodell auf Basis der Informationsentropie vor [77]. *Keckl et al.* [78] demonstrieren, wie die Komplexität systematisch in den Prozess der Planung einer Montagelinie einbezogen werden kann. Um Qualitätsaspekte und das Risiko für menschliche Fehler bereits in der Planungsphase berücksichtigen zu können, schlagen *Refflinghaus und Kern* vor die etablierte

Analysemethode *methods time measurement* (MTM) um eine Betrachtung der menschlichen Zuverlässigkeit zu ergänzen [79].

Neben den eher abstrakten Betrachtungen zu Absicherungs- und Anlaufstrategie sowie der Montageplanung lassen sich in der untersuchten Literatur auch konkretere Ansätze für die Absicherung bestimmter montagerelevanter Aspekte finden. Die Bewertung manueller Montagetätigkeiten aus ergonomischer Sicht zählt dabei zu den populärsten Anwendungsfällen. Die Absicherung ergonomischer und physiologischer Aspekte dient dazu Tätigkeiten hinsichtlich der Belastung der Werker zu optimieren, gesundheitliche Beeinträchtigung auszuschließen und die Einhaltung arbeitsrechtlicher Vorgaben sicherzustellen. Die Forschung von *Engström und Medbo* zur Durchführung einer (rudimentären) Ergonomiebewertung mittels Video und elektronischem Fragebogen [80] stellt ein frühes Beispiel dar, die Bewertungsmethoden wurden seither deutlich verfeinert. Aktuellere Methoden wie die „*design for assembly scorecard*“ von *Village et al.* [81] ermöglichen zwar eine sehr detaillierte Analyse, basieren jedoch immer noch in weiten Teilen auf der subjektiven Einschätzung von Beobachtern. Um die Evaluation zu objektivieren und den Aufwand zu reduzieren, wird zunehmend versucht technische Systeme und Sensorik einzusetzen. Die Arbeiten von *Bortolini et al.* [82] sowie *Krüger und Nguyen* [83] demonstrieren die Anwendung von *computer-vision* in diesem Kontext, in der Praxis werden auch andere Verfahren zur Bewegungserfassung (*motion capturing*) sowie Kraftmessungssysteme eingesetzt.

Cluster 2: Ansätze für die technische Unterstützung der Absicherung

Aspekte der produktionsbezogenen Produktabsicherung wie die Prüfung der Kollisionsfreiheit, Ein- und Ausbaupfade sowie die Zugänglichkeit von Arbeitsräumen und Verbindungsstellen mit Werkzeugen werden heute bereits überwiegend virtuell abgesichert (vgl. beispielsweise [72]) und während der Hardwarebauphasen lediglich implizit validiert (Defizite werden mit hoher Wahrscheinlichkeit automatisch entdeckt und gemeldet), weswegen Methoden für die gezielte Absicherung dieser Themen mittels Hardware von geringer Bedeutung sind und entsprechend in der Literatur kaum erwähnt werden. Ein viel stärkerer Fokus liegt hier auf der Optimierung und Automatisierung der virtuellen Methoden.

Die produktionsbezogene Prozessabsicherung sowie die Ressourcenabsicherung erfolgen heute überwiegend in Form von interdisziplinären Workshops während der Prototypen- und Vorserienphase. Typischerweise werden dabei Aspekte wie die Korrektheit und Vollständigkeit der Arbeitsinhalte, die Plausibilität der bei der Montageplanung geschätzten Ausführungszeiten, die Reihenfolge der Montageschritte, die Fehlhandlungssicherheit, ergonomische Aspekte sowie die Eignung der geplanten Werkzeuge, Hilfs- und Betriebsmittel betrachtet. Diese Workshops sind in der Regel mit beträchtlichem Aufwand verbunden, weshalb auch hier Optimierungsmöglichkeiten und Anwendungsfälle für innovative Technologien gesucht werden. *Prieur et al.* schlagen ein hybrides Workshopkonzept vor, bei dem *mixed-reality* Techniken die Prozessvalidierung an Hardwareprototypen unterstützen und digitale Werkzeuge eine interaktive Anpassung der geplanten Abläufe und Stationslayouts während der Evaluation ermöglichen [16]. Dies soll die Effizienz der Absicherung steigern, indem das situative Verständnis der Beteiligten durch Visualisierung unterstützt und die Bewertung alternativer Szenarien bzw. Änderungen ermöglicht wird. Um im Rahmen von Absicherungsworkshops sensorisch Daten

erfassen zu können und insbesondere die präzise und korrekte Identifikation und Lokalisation von kleinen Objekten wie Schrauben zu ermöglichen, untersuchen *Gladysz und Lysiak* den Einsatz von mittels Licht aktivierbarer, passiver RFID-Tags [84]. Die Tags werden beispielsweise an Verbindungsstellen eines Werkstücks angebracht. Nähert sich der Werker mit einem Handwerkzeug, das mit einer entsprechenden Lichtquelle ausgestattet ist, wird der RFID-Tag aktiviert und kann von einer Lesestelle ausgelesen werden. Dadurch kann beispielsweise die Einhaltung einer vorgegebenen Schraubreihenfolge überprüft werden.

Werden im Rahmen der Absicherungstätigkeit Defizite entdeckt, so müssen diese dokumentiert und an die zuständigen Entwicklungs- bzw. Planungsstellen kommuniziert werden. Gegebenenfalls sind zur Identifikation der Ursachen weitere Analysen erforderlich. Sobald entsprechende Lösungsvorschläge vorliegen, müssen diese wiederum auf ihre Wirksamkeit hin untersucht werden. Unter dem Begriff Problemmanagement werden die entsprechenden Tätigkeiten und Methoden zusammengefasst. Eine Herausforderung liegt dabei oftmals in der Art, Qualität und Vollständigkeit der Dokumentation von Defiziten. Verbale Meldungen oder nicht standardisierte Dokumente in Freitextform erschweren die Klassifizierung und damit die Zuordnung bzw. Lenkung, zudem mangelt es oftmals an Transparenz hinsichtlich der Art und Schwere offener Probleme. Um dieser Herausforderung zu begegnen, schlagen *Yang et al.* die Anwendung von Text-Mining-Techniken auf Validierungsreports und Problembeschreibungen vor [85]. *Huertas-Quintero et al.* beschreiben ein Expertensystem, das den Anwender auf Basis von Abhängigkeitsmodellen und Simulationen des Produktionssystems bei der Ursachenanalyse eines vorliegenden Fehlerbildes unterstützt [86]. Die Nutzung ihres Systems demonstrieren sie an einem vergleichsweise einfachen, abgeschlossenen Anwendungsfall aus der Elektronikindustrie. Wenngleich die Modellierung aller Wirkzusammenhänge und Fehlerwirkungen in einem komplexen Montagesystem wie einer Fahrzeugendmontage unrealistisch scheint, könnte sich der Ansatz auf manuelle Montagesysteme übertragen lassen, sofern es gelingt die Montageabläufe auf einzelne Tätigkeiten geringer Komplexität herunterzubrechen und jeweils ausreichend abstrahierte und dennoch aussagekräftige Fehlerklassen zu bilden. Einen ähnlichen Ansatz mit Fokus auf die Klassifizierung geometrischer Abweichungen mittels maschinellem Lernen beschreiben *Mannar und Ceglarek* [87]. *Burggräf et al.* geben einen umfassenden Überblick über die Anwendung von Expertensystemen und wissensbasierter Problemlösung in der physischen Produktentwicklung [88].

Cluster 3: Wissens- und Problemmanagement, Verfahren für die Optimierung

Ist nach umfassender Validierung und Behebung aller entdeckter Defizite ein in der Serie realisierbarer Produktionsablauf erreicht, stellt dieser aufgrund der hohen Komplexität und der Vielzahl potenzieller Lösungen in der Praxis nie das theoretisch erreichbare globale Optimum, sondern lediglich eine mögliche Variante (bestenfalls ein lokales Optimum) dar. Somit besteht stets weiteres Optimierungspotenzial und auch über den SoP hinaus werden, insbesondere bei einer Änderung der äußeren Einflüsse bzw. Rahmenbedingungen, laufend Optimierungsmaßnahmen umgesetzt. In der Lean-Philosophie, die das produzierende Gewerbe maßgeblich geprägt hat, wird dies als kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP) bezeichnet und als wesentlicher Faktor gesehen, um die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens zu erhalten (der Begriff beschränkt sich dabei nicht nur auf Produktionsprozesse, sondern umfasst auch Geschäftsprozesse im allgemeineren Sinne). *Angelis und Fernandes* beleuchten die

Zusammenhänge zwischen der Unternehmenskultur, den unternehmensspezifischen Vorgehensweisen und Arbeitsbedingungen auf die Produkt- und Prozessoptimierung im Rahmen des KVP und insbesondere die Beteiligung der Werker auf dem Shopfloor [89].

Wie *Terwiesch und Bohn* [62] charakterisieren auch *Scrimieri und Ratchev* [90] die Problemlösung und insbesondere die Optimierung im industriellen Umfeld als individuellen, stark von den beteiligten Personen abhängigen Versuchs-Irrtums-Prozess, bei dem Experimente eine zentrale Rolle spielen. Sie bemängeln, dass das Wissen bei diesem Vorgehen stark an Individuen gebunden ist, was häufig zu Wissensverlust führt und den Transfer erschwert. Daher schlagen sie ein System zur Erfassung von Anpassungen an Montagesystemen und deren Auswirkungen vor, um das Erfahrungswissen zu formalisieren, den Transfer zu erleichtern und weniger erfahrenem Personal eine Hilfestellung in Form eines Expertensystems zu geben. Ihre Analyse konzentriert sich primär auf automatisierte Montagesysteme (also beispielsweise die Justierung bestimmter Parameter), der Grundgedanke lässt sich jedoch möglicherweise auch auf andere Problemstellungen wie beispielsweise die Steigerung der Qualität in einer manuellen Montage übertragen.

Abschließend ist Wissenstransfer in die Serie zu betrachten. Die Montageabläufe, die von den Planern beschrieben und im Rahmen der virtuellen und physischen Absicherung zusammen mit der Produktintegration und den Werkern in der Prototypen- und Vorserienproduktion validiert und optimiert wurden, müssen an das Personal der Serienproduktion übergeben werden. Entsprechend dem Trainingskonzept müssen die Arbeitsanweisungen in geeigneter Form aufbereitet und ggf. mit weiteren Informationen angereichert werden. Heute erfolgt die Unterweisung in der Regel zunächst theoretisch abseits der Line und später praktisch in einer Trainingsumgebung oder direkt an der Montagelinie durch erfahrene Mitarbeiter aus der Serienproduktion, die bereits während der Serienentwicklung in den Entwicklungs- und Planungsprozess eingebunden werden und diesen mit besonderem Fokus auf die montagegerechte Produktgestaltung und werksspezifische Anforderungen begleiten. Um die Anlernprozesse und damit den *ramp-up* zu beschleunigen, werden einerseits zunehmend virtuelle und hybride Trainingskonzepte erprobt, andererseits kann durch eine Reduktion der Komplexität der Montage-tätigkeit bei gleichzeitiger Unterstützung durch digitale Assistenzsysteme der Trainingsbedarf insgesamt gesenkt werden. Beide Konzepte erfordern eine hohe Qualität und ein maschinenlesbares Format der Arbeitsanweisungen. *Fischer et al.* sehen dies auch als Voraussetzung für schnellere Innovationszyklen und eine effizientere Übertragung von Neuerungen aus der Entwicklung in die Serie und empfehlen die Integration von 3D-Modellen [91]. Sie demonstrieren auch, wie ein Werkerinformationssystem für das Anlernen von Montagepersonal eingesetzt werden kann.

Duan et al. präsentieren ein Modell menschlicher Montagefertigkeiten bei dem sie sensorische, kognitive und motorische Fähigkeiten differenzieren [92]. Sie argumentieren, dass einige Fähigkeiten entweder nicht übertragen werden müssen, da sie intuitiv verständlich sind, während andere schlicht nicht übertragen, sondern lediglich durch entsprechendes Training erworben werden können. Ihrer Analyse zufolge eignen sich sowohl kognitive Aspekte wie auch motorische Aspekte für einen systematischen Transfer. Für die Erfassung, Priorisierung und Unterweisung der Werker schlagen sie eine Methode basierend auf standardisierter, natürlicher Sprache vor.

3.2.2.2 Informations- und Assistenzsysteme für die manuelle Montage

Die Cluster und Kategorien des zweiten Themenbereichs *Informations- und Assistenzsysteme* sind in **Abbildung 25** illustriert.

Zunächst wurden Beiträge identifiziert, die Anwendungsmöglichkeiten für Informations- und Assistenzsysteme beschreiben und den erwarteten Nutzen diskutieren oder Erfahrungen aus der Praxis berichten (Cluster 1 – orange). Anschließend wurden Ansätze für eine „Industrie 4.0“-zentrierte Gestaltung von Montagesystemen, eine durchgängige Datennutzung, die Optimierung bzw. Automatisierung der Montageplanung sowie die Generierung und Strukturierung von Montageinformationen in einem zweiten Cluster (Cluster 2 – blau) gesammelt.

Der größte Teil der Beiträge in diesem Themenbereich beschäftigt sich mit der Übermittlung von Information an den Werker, also möglichen Informationsträgern, geeigneten Darstellungsformen, der Informationsdichte und kognitiven Aspekten der Montageassistenz (Cluster 3 - grau). Besonders umfangreich untersucht und diskutiert werden dabei verschiedene Endgerädetypen (z.B. Monitore, Projektoren, Mobilgeräte / Wearables) und ihre Eignung für die Montage. Weitere Arbeiten dieses Clusters befassen sich mit Aspekten der Motivation, dem Feedback an die Werker (z.B. bei Montagefehlern) sowie Lernprozessen.

Arbeiten zur Nutzung von Sensorik (insbesondere Computer-Vision) und der Überwachung von Montageprozessen (hauptsächlich Erkennung der Montagesituation bzw. des Montagefortschritts sowie die Detektion von Montagefehlern) bilden das vierte, eng verwandte und ähnlich populäre Themencluster (Cluster 4 – gelb). Zu diesem wurden auch Beiträge gezählt, die sich mit Bedienkonzepten für Assistenzsysteme befassen.

Abschließend wurden Arbeiten, die Architekturen für Assistenzsysteme diskutieren oder Hilfestellungen für die Entwicklung bzw. Implementierung solcher Systeme geben in einem weiteren Cluster zusammengefasst (Cluster 5 – grün).

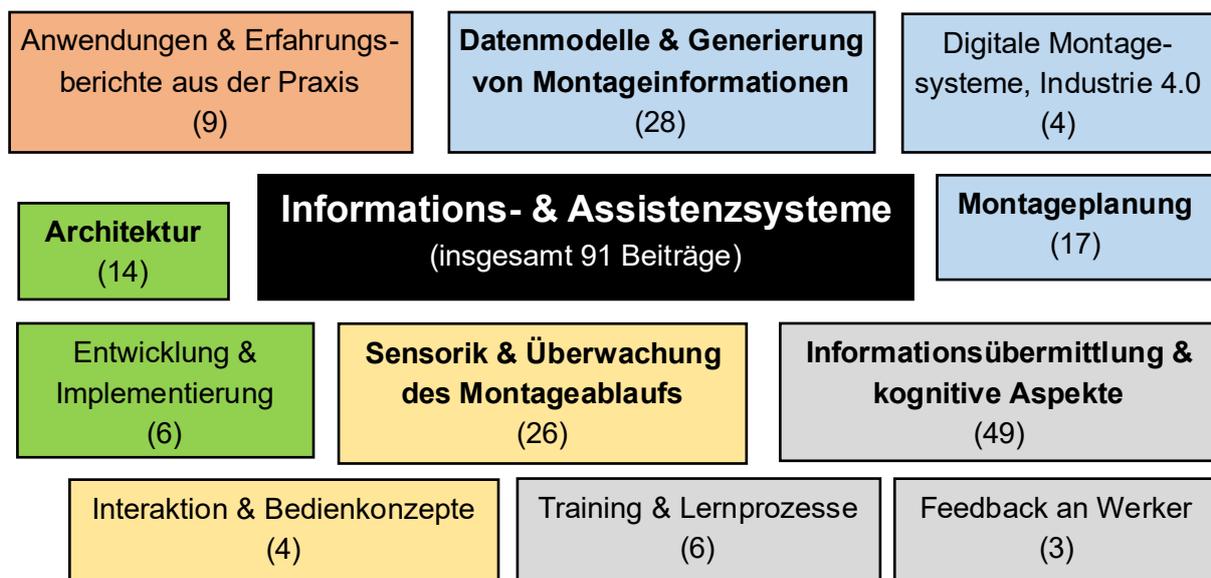


Abbildung 25: Cluster im Themenbereich Informations- und Assistenzsysteme (mit Anzahl der der jeweiligen Kategorie zugerechneten Beiträge)

Cluster 1 – Anwendungsmöglichkeiten und Erfahrungen aus der Praxis

Informations- und Assistenzsysteme für industrielle Anwendungsfälle haben in den letzten Jahren große Aufmerksamkeit erfahren und waren Gegenstand umfassender Forschung. Die Anwendbarkeit solcher Systeme wird dabei für unterschiedlichste Szenarien diskutiert und untersucht. Zu den ersten Anwendungsfeldern zählte die Unterstützung von mobilen Service-Technikern bei Instandhaltungs- und Wartungsarbeiten oder im Kundenservice. Die Tätigkeiten in diesen Anwendungsfällen sind häufig durch eine hohe Varianz, oftmals in Verbindung mit einer komplexen Ursachensuche geprägt, weshalb sie sich gut für eine Unterstützung durch gezielte Informationsbereitstellung in Verbindung mit *remote-support* Lösungen zur Kontaktaufnahme mit erfahrener Personal eignen. Einen Überblick zur Forschung in diesem Bereich bieten *Herterich et al.* [93].

Assistenzsysteme lassen sich auch in der Produktion komplexer Unikate oder bei kleineren Losgrößen einsetzen, wie sie im Schiffs- (vgl. [94]) und Nutzfahrzeugbau (vgl. [95]) oder der Luftfahrtindustrie (vgl. [96; 97]) anzutreffen sind. Aufgrund der Weitläufigkeit der Produktionsstätten liegt der Fokus in diesen Anwendungsfällen ebenfalls auf mobilen Lösungen. In der Automobilindustrie sind an den Linien der Endmontage bislang hauptsächlich einfache Informationssysteme anzutreffen, die den Werker mit wenigen Symbolen, Bildern oder Zeichen über die aktuell zu montierende Variante informieren. Trotz der zunehmenden Varianz der Produkte sind die jeweilig auszuführenden Tätigkeiten aufgrund der hohen Arbeitsteiligkeit noch so überschaubar, dass keine umfassendere Assistenz benötigt wird. Aufgrund der strengen Taktzeiten wäre die Aufnahme und Verarbeitung detaillierter Montageanweisungen oder eine Interaktion mit einem Assistenzsystem ohnehin nicht möglich, stattdessen wird auf ein, entsprechend umfangreiches, Training der Werker gesetzt. Modernere Assistenzsysteme mit größerem Funktionsumfang finden bislang lediglich in Randbereichen wie der Komponentenfertigung oder an Nacharbeitsplätzen Anwendung, da hier Varianz und Komplexität deutlich höher liegen und ein etwas geringerer Zeitdruck als in der starr verketteten Endmontagelinie herrscht. Ein Konzept für die Montageassistenz im Bereich der Nacharbeit basierend auf dynamisch erzeugten Arbeitsplänen präsentieren *Müller et al.* [98].

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt im Hinblick auf den Wissenstransfer aus der Serienentwicklung in die Serie angesprochen, wird der Einsatz von Montageassistenzsystemen auch für das Anlernen und das Training von Montagemitarbeitern erforscht. Ein konkretes Beispiel hierfür geben *Werrlich et al.* mit ihrem Trainingskonzept für die Motormontage basierend auf einem *augmented-reality* Assistenzsystem [99]. Ein vergleichsweise neuer Ansatz besteht in der Kombination von Montageassistenz- und MRK-Systemen, wie er z.B. von *Makris et al.* diskutiert wird [100].

Cohen et al. beschreiben in Ihrer Analyse wie sich die Trends der Industrie 4.0 und insbesondere smarte Montagesysteme auf die heute vorherrschenden Montage-Paradigmen auswirken werden und welche Potenziale sich durch die Transformation ergeben könnten [101]. Zu den potenziellen Vorteilen zählen sie eine Reduktion der Automatisierungskosten, bessere Verwaltbarkeit (Software-defined Assembly), höhere Flexibilität durch reduzierten Anlern- und Trainingsbedarf, geringere Qualitätskosten durch Früherkennung und Vermeidung von Fehlern sowie eine effizientere Logistik. Als Haupt-Prinzipien smarterer Montagesysteme nennen

sie Konnektivität und Datenerhebung, die (automatisierte) Ableitung von Information aus den gesammelten Daten zur Optimierung und Sammlung von formalisiertem Wissen sowie letztlich selbstoptimierende Systeme und Strukturen. Dabei sehen sie den Menschen insbesondere aufgrund seiner Flexibilität und Anpassungsfähigkeit nach wie vor als zentralen Bestandteil der Montage. Diese Ansicht vertreten auch *Krugh und Mears*, die das Konzept der *Smart Factory* mit ihren cyber-physischen Systemen um das Modell eines „*Cyber-Human-Systems*“ ergänzen [102]. Die informationstechnische Einbindung des Menschen in die Informationsflüsse setzen sie dabei als Grundlage voraus und sprechen von einem „*Internet-of-People-and-Things*“. Einen vergleichbaren, menschenzentrierten Ansatz für die Gestaltung smarter Montagesysteme schlagen auch *Zamfirescu et al.* vor und zeigen die Anwendung an einem Demonstrator mit entsprechenden Assistenzfunktionen [103].

Die Optimierung der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Automatisierungstechnik, bzw. den gezielteren Einsatz der jeweiligen Stärken sehen auch *Dencker et al.* vor dem Hintergrund zunehmender Komplexität bei gleichzeitig steigenden Flexibilitätsanforderungen als zentrale Herausforderung für den Entwurf von modernen Montagesystemen [104]. In ihrer Betrachtung charakterisieren sie potenzielle Systeme anhand ihres mechanischen sowie informationstechnischen bzw. kognitiven Automatisierungsgrades, wobei sie sich insbesondere auf die Faktoren Robustheit und Anpassungsfähigkeit konzentrieren. *Case et al.* konnten mit ihrer Studie in der Montage von Dieselmotoren zeigen, dass durch eine optimierte Gestaltung der Werkerinformation eine signifikante Reduzierung menschlicher Fehler und damit der Nacharbeit bzw. dem Ausschuss erreicht werden kann [105]. Auch *Gewohn et al.* stellten in ihrer Studie mit einem Montageassistenzsystem für die Automobilmontage eine positive Auswirkung auf die Qualitätskennzahlen fest [106].

Ein weiteres Motiv für den Einsatz von Assistenzsystemen stellt der demographische Wandel dar. Einerseits stehen den Unternehmen qualifizierte Mitarbeiter aufgrund des steigenden Renteneintrittsalters länger zur Verfügung, andererseits fällt es insbesondere deutschen Unternehmen zunehmend schwerer neue Fachkräfte zu gewinnen. Es ist daher zweckmäßig, Montagearbeitsplätze so zu gestalten, dass auch leistungsgewandelte Mitarbeiter effizient und ohne physische oder kognitive Überbeanspruchung eingesetzt werden können. Auch die Inklusion von Personen mit Behinderungen kann durch Assistenzsysteme unterstützt werden, wie *Funk et al.* untersuchten [107; 108]. Durch die Berücksichtigung motivationspsychologischer Aspekte bei der Konzipierung von Assistenzsystemen lassen sich Motivation und Produktivität der Mitarbeiter beeinflussen. *Korn et al.* diskutieren in diesem Bereich die Anwendung von spieltypischen Elementen (engl. *Gamification*) im Produktionsumfeld [109].

Über den praktischen Einsatz von Assistenzsystemen berichten beispielsweise *Haslwanter und Blazeovski* [110; 111]. Auf Basis ihrer Erfahrungen mit der Einführung eines solchen Systems in einer variantenreichen Motormontagelinie raten sie besonderes Augenmerk auf die Benutzerfreundlichkeit sowie die unterschiedlichen Zielgruppen und ihre Anforderungen zu legen. Sie geben zu bedenken, dass auch vermeintlich geringe funktionale Unterschiede drastische Auswirkungen auf die praktische Nutzung haben können und empfehlen das geplante System bereits während der Entwicklung intensiv unter realistischen Bedingungen im späteren Einsatzgebiet zu testen, um die Akzeptanz der Lösung bei den Anwendern sicherzustellen. Dass bei der Entwicklung eines Montageassistenzsystems die individuellen Bedürfnisse

unterschiedlicher Benutzergruppen berücksichtigt werden müssen, betonen auch *Kosch et al.* [112]. Unter dem Titel „*One size does not fit all*“ berichten sie über unterschiedlichen Reaktionen der Werker in Abhängigkeit ihrer jeweiligen Qualifikation und Erfahrung. Während die Leistung bei unerfahrenen und kognitiv beeinträchtigten Werkern mittels Montageassistentz verbessert werden konnte, beurteilten erfahrene Mitarbeiter und Experten das System bei bekannten Aufgaben eher als störend und zeigten reduzierte Leistung.

Johansson et al. ermittelten in einer Fallstudie die Informations- und Assistenzbedarfe in unterschiedlichen Bereichen der Montage eines Nutzfahrzeugherstellers durch Interviews [113]. In ihrer Analyse beleuchteten sie auch Defizite der dort bestehenden Montageinformation mittels einfacher Informationssysteme oder papierbasierter Arbeitsanweisungen und leiten daraus Optimierungspotenziale ab. Zu den gravierendsten Problemen zählen sie fehlerhafte und veraltete Arbeitsanweisungen, die in dem beobachteten Maß dazu führen, dass die Werker den bereitgestellten Informationen nicht trauen. Die Aktualisierung der Information bei Änderungen scheint insbesondere bei älteren Informationssystemen ohne entsprechende Schnittstellen und den papierbasierten Dokumentationen langwierig und aufwändig. Die Werker vertreten daher die Ansicht, dass das Anlernen neuer Mitarbeiter durch andere, erfahrenere Werker während der produktiven Arbeit die wesentlichste Form der Qualifizierung und Information darstellt, wenngleich sie dies als unbefriedigend erachten. Auch unzureichendes Feedback bezüglich Montagefehlern und qualitativen Defiziten kritisieren die befragten. Da die Untersuchung auch zeigt, dass ein großer Teil der primär textuell bereitgestellten Information kaum benötigt bzw. genutzt wird, empfehlen sie für künftige Montageassistentzsysteme stärker auf individualisierte, dynamische Anzeigen zu setzen, die den Werkern bedarfsgerecht und situativ angepasst Informationen darstellen und dabei stärker Bilder und dynamische bzw. interaktive Visualisierungen als Texte zu nutzen. Als weitere Optimierungsmöglichkeit nennen sie die Vernetzung mit Betriebsmitteln wie der Schraubtechnik sowie die Integration von zusätzlichen Hintergrundinformationen beispielsweise zur Behandlung von typischen Problemen.

Neben den Erfahrungsberichten aus der industriellen Praxis bieten einige Beiträge auch methodische Unterstützung für die Konzeption und Gestaltung von Assistenzsystemen. *Merkel et al.* beschreiben eine sequentiell-iterative Vorgehensweise für den anwendungsspezifischen Entwurf basierend auf einer Analyse der jeweils erforderlichen Assistenzfunktionen [114]. Sie unterscheiden dabei arbeitsplatz-, werker- und aufgabenspezifische Funktionen. Anschließend sieht ihre Methode die Generierung alternativer Gesamtkonzepte aus potenziellen Teillösungen der Einzelfunktionen vor, wobei letztere aus einer Technologie- und Komponentendatenbank gewählt werden. Schließlich werden die Konzepte aus ökonomischer Perspektive verglichen und so lange angepasst, bis eine geeignete Lösung gefunden ist. Aus den Assistenzfunktionen leiten sie auch die Notwendigen Informationsflüsse zwischen Assistenzsystem, dem Werker, anderen IT-Systemen und dem Montageobjekt ab. Einen ähnlichen, jedoch etwas detaillierteren Ansatz beschreiben *Hold et al.* mit ihrer an die MTM Methode angelehnten Vorgehensweise, bei der sie den Assistenzbedarf auf Basis der Komplexität von Produkt und Arbeitsplatz ableiten [115]. Die Anwendung ihrer Methode und Möglichkeiten zur Integration in den Montageplanungsprozess diskutieren sie in [116; 117].

Cluster 2 – Montageplanung, die Generierung Montageinformation und Datenmodelle

Der Entwurf adäquater Datenmodelle sowie die möglichst effiziente Erzeugung der für die Montageassistenz erforderlichen Informationen (insb. Arbeitsanweisungen) zählt zu den komplexesten Herausforderungen bei der Entwicklung von Assistenzsystemen. Die heute in der Praxis anzutreffenden, meist recht einfach strukturierten Informationssysteme nutzen überwiegend proprietäre Datenstrukturen und verfügen in der Regel nicht über eine Anbindung an vorgelagerte Planungssysteme. Auch bei den Montageplanungssystemen selbst mangelt es heute an Integration und Automatisierung (vgl. [118]). Folglich erfordert die Generierung und Zusammenstellung der Montageanweisungen sowie der Bereitstellung im Montageinformationssystem vielfältige manuelle Tätigkeiten. Neben dem personellen Aufwand limitiert dieser Umstand die Flexibilität und Geschwindigkeit bei Änderungen. Dieser Problematik wurde in der Forschung einige Aufmerksamkeit gewidmet, die wesentlichen Forschungsschwerpunkte werden im Folgenden aufgezeigt.

Die Ergebnisse der Produktentwicklung in Form der Produktstruktur und der CAD-Daten stellen den Ausgangspunkt der Montageplanung dar. Einen möglichen Ansatz, um aus diesen Daten automatisiert eine Montagereihenfolge zu ermitteln schildern *Ou und Xu* [119]. Für den umgekehrten Prozess der Demontage lassen sich potenzielle Abfolgen ebenfalls automatisiert ermitteln, wie *Jacob und Popescue* zeigen [120]. Die Tätigkeiten der Produktentwicklung und Montageplanung werden zunehmend parallelisiert, um die Entwicklungszeit insgesamt zu reduzieren. Dabei spielt der effiziente Datenaustausch bzw. die Kollaboration eine entscheidende Rolle. *Gruhier et al.* schlagen daher ein Informations-Management-Framework vor, das die Systeme der Produktentwicklung, Konstruktion und Montageplanung integrieren und die interdisziplinäre Zusammenarbeit verbessern soll [118]. Dabei berücksichtigen sie jedoch nicht, wie die resultierenden Informationen anschließend in die Produktion übertragen und auf dem Shopfloor genutzt werden können oder wie der Shopfloor in den Informationsfluss eingebunden werden könnte.

Auf eben diesen Informationsaustausch zwischen Shopfloor und Montageplanung konzentrieren sich *Müller et al.* in ihrer Forschung zu modularen, rekonfigurierbaren Montagesystemen [121; 122]. Ihr Konzept umfasst verschiedene Module für die Montage, die mit ihrer Ausstattung (diverse Betriebsmittel, Assistenzsysteme und automatisierte Komponenten) unterschiedliche Montagefunktionen realisieren können. Diese Fähigkeiten charakterisieren die jeweiligen Module und lassen sich bei der Montageplanung den jeweiligen Anforderungen des geplanten Produkts gegenüberstellen. Aufgrund der Rückmeldung der aktuellen Konfiguration des Montagesystems in das Planungssystem ist der Planer daher in der Lage festzustellen, ob ein neues Produkt auf der bestehenden Linie montiert werden kann oder ob eine Rekonfiguration erforderlich ist. *Rentzos et al.* demonstrieren, wie sich aus 3D-Geometrien und semantischen Daten der Montageplanung effizient *augmented-reality* Assistenzfunktionen für den Shopfloor realisieren lassen [123].

Einen durchgängigen Prozess und Informationsfluss von der Montageplanung über die virtuelle Absicherung bis hin zur Montageassistenz skizzieren *Bönig et al.* [124]. Ihr Konzept erweiterten sie später um die Abbildung des Verhaltens elastischer Bauteile, das beispielsweise bei der Montage von Stromleitungen in Elektrofahrzeugen berücksichtigt werden muss [125].

Wenn bereits ein physisches Montagesystem existiert, kann es für die Planung neuer oder zusätzlicher Produkte, oder auch das Training neuer Mitarbeiter hilfreich sein, den Montageablauf aus dem realen Prozess zu extrahieren und darauf aufbauend Montageanweisungen zu generieren. *Pham und Xiao* demonstrieren dies mittels *computer-vision* [126], *Gorecky et al.* schlagen für die gleiche Zielsetzung die Nutzung von Sensorik am Körper des Werkers vor [127].

Den Praxisberichten zufolge und auch von *Claeys et al.* [128] bestätigt, besteht eine weitere wesentliche Herausforderung bei der Konzeption von Assistenzsystemen darin Information bedarfsgerecht bereitzustellen. Wird dies nicht berücksichtigt, kann eine reduzierte Arbeitsleistung infolge kognitiver Überforderung (vgl. [129]) oder reduzierter Motivation bzw. unnötiger Ablenkung (vgl. [130]) die Folge sein. Um Assistenzfunktionen und Informationsbereitstellung an die jeweilige Montagesituation anpassen zu können, benötigen die Systeme Kontext, einerseits zum aktuellen Zustand bzw. Montagefortschritt und andererseits zum Montageumfeld, den Betriebsmitteln und dem Werker. *Claeys et al.* haben dazu basierend auf dem ISA-95 Standard ein einfaches Datenmodell mit Fokus auf die aufgabenspezifische Qualifikation des Monteurs entworfen [131, S. 1184].

Der Montagefortschritt kann bei einem linearen Ablauf entweder bestimmt werden, indem Arbeitsschritte manuell durch den Werker quittiert werden, oder durch Sensorik bzw. vernetzte Betriebsmittel. Während ersteres häufig bei mobilen Systemen erforderlich ist, bei denen eine automatische Erfassung komplexer zu realisieren ist, eignen sich besonders stationäre Arbeitsplätze für vielfältige sensorbasierte Ansätze. *Hold und Erol* beschreiben eine mögliche Architektur für ein eventgetriebenes cyber-physisches Assistenzsystem und validieren diese an einem Aufbau, der Ultraschallsensoren für die Bewegungserkennung nutzt und damit den Montageablauf überwachen kann [132]. Neben diverser anderer Sensorik werden auch *computer-vision* Systeme für diesen Anwendungsfall erforscht, darauf wird im Themencluster zu Sensorik und Nutzerinteraktion noch ausführlicher eingegangen.

Eine zusätzliche Herausforderung ergibt sich in Fällen, bei denen der Ablauf nicht planbar oder ein linearer Ablauf nicht gewährleistet ist, wie beispielsweise bei Reparaturen oder Nacharbeit. *Zäh und Wiesbeck* schlagen für derartige Fälle die Nutzung von Zustandsgraphen in Kombination mit Routing-Algorithmen vor [133]. Eine praktische Anwendung dieses Konzepts demonstrieren *Müller et al.* mit ihrem Assistenzsystem für die Nacharbeit, bei dem sie basierend auf Fehler-Codes einen dynamischen Arbeitsplan berechnen [134].

Einen alternativen Ansatz, um Werker in einem solchen Szenario unterstützen zu können, schlägt *Tönnies* mit einem System vor, das auf Basis historischer Nacharbeitsdaten effiziente Arbeitspläne für eine vorliegende Fehlersituation vorschlagen kann [45]. Der Nachteil dieses Ansatzes liegt darin, dass er entsprechend umfangreiche Daten in ausreichend hoher Qualität erfordert und ein solches System prinzipbedingt keine Hilfe in neuartigen Fehlersituationen liefern kann.

Cluster 3 – Informationsübermittlung und kognitive Aspekte

Wie sich Assistenzfunktionen an individuelle Bedürfnisse der Nutzer anpassen lassen erläutern beispielsweise *Arndt, Anderl und Galaske* [135; 136]. Basierend auf einer Datenbank, welche Daten über die Mitarbeiter enthält und einer Qualifikationsmatrix adaptieren sie den Informationsgehalt und die Darstellung entsprechend der Qualifikation, des Trainingsgrades und der Präferenzen des jeweiligen Werkers. Um die Assistenz besser personalisieren zu können, erweitern *Claeys et al.* ihr generisches Kontextmodell um eine ontologiebasierte Filterung, die es beispielsweise ermöglicht den Informationsgehalt in Abhängigkeit der Komplexität einer Montageaufgabe oder der Leistung des Werkers anzupassen [137]. Auch *Müller et al.* berücksichtigen in ihrem Konzept für Nacharbeitsplätze die individuelle Qualifikation der Mitarbeiter [98].

Während sich die bisher diskutierten Konzepte auf den Bereich der kognitiven Assistenz beschränken, also den Anwender bei der Interpretation einer Situation unterstützen, ihm durch Informationsbereitstellung ggf. in Kombination mit einer Vorauswahl von Handlungsalternativen eine Entscheidungsgrundlage bieten und lediglich in Ausnahmefällen regelbasiert Aktionen auslösen existieren auch erste Ansätze für eine kognitive Automatisierung. Derartige kognitive Systeme verfügen über eine erweiterte situative Wahrnehmung, die Fähigkeit die wahrgenommene Umwelt zu interpretieren, Alternativen zu bewerten, Entscheidungen zu treffen und autonom zu agieren. Dies setzt ein Verständnis über Zusammenhänge, Informationen aus der Vergangenheit und die Fähigkeit die nahe Zukunft zu antizipieren voraus. *Haslgrubler et al.* beschreiben ein *machine-learning* getriebenes Framework für ein Assistenzsystem das derartige Eigenschaften aufweist und demonstrieren ihren Ansatz an einem Fallbeispiel aus der Sportartikelindustrie [138]. *Aehnel und Bader* wählen einen etwas konservativeren Ansatz und schlagen vor, konventionelle Montageassistenzkonzepte basierend auf strukturierten Daten um Funktionalität zur automatisierten Sammlung, Formalisierung und Anwendung von Hintergrundwissen zu erweitern, um ein lernendes System zu schaffen, das auch in unvorhergesehenen Situationen Hilfe leisten kann [139].

In den vorhergehenden Abschnitten wurden Ansätze für die Erzeugung, Strukturierung, Organisation und Auswahl bzw. Filterung von Montageinformationen vorgestellt. Neben den Inhalten selbst werden im Kontext von Montageassistenzsystemen auch unterschiedliche Darstellungsformen, Informationskanäle und Anzeigegeräte ausführlich diskutiert und hinsichtlich kognitiver Aspekte sowie ihrer Auswirkungen auf die Arbeitsleistung erforscht. *K. Sebastian* untersuchte in ihrer Dissertation [140] die Wahrnehmung, das Verständnis und die Lerneffekte bei Montagetätigkeiten. Sie stellte fest, dass es für das Verständnis und Erlernen einer Gesamtaufgabe wichtig ist, diese in eine hierarchische Struktur von Teilaufgaben und Events mit definierten Grenzen herunterzubrechen. *Fast-Berglund et al.* unterscheiden in ihrer Betrachtung des Informationsmanagements in Assistenzsystemen die Dimensionen Informationsstruktur (Datenmodell), Informationsinhalt (Zeichnungen, Texte, Checklisten, etc.) sowie Informationsträger (Monitore, Mobilgeräte, Audio, etc.) und erläutern, dass es für eine effiziente kognitive Unterstützung erforderlich ist, die Ausprägung der jeweiligen Dimension je nach Anwendungsfall individuell auszuwählen [141].

Der Zusammenhang zwischen Informationsdichte und mentaler Belastung wurde beispielsweise von *Fujita et al.* [142] untersucht. Die mentale Beanspruchung bewerteten sie im Rahmen ihrer Studie in der Zellenfertigung auf Basis physiologischer Parameter, als Metrik für die Informationsdichte nutzten sie die Anzahl der gleichzeitig angezeigten Arbeitsschritte. Die Montageleistung wurde über die Ausführungszeiten und die Fehlerrate beurteilt. Die Ergebnisse der Studie zeigen eine mit der Informationsdichte zunehmende kognitive Belastung, die ab einem gewissen Punkt zu einer deutlich reduzierten Arbeitsleistung und gesteigerten Fehlerrate führt. Die erhöhte Fehlerrate bei Darstellung lediglich eines Arbeitsschrittes gegenüber der gleichzeitigen Anzeige von zwei oder drei Tätigkeiten wird von den Autoren als Hinweis dafür gesehen, dass Kontext in Form vorhergehender bzw. nachfolgender Arbeitsschritte die selbstständige Erkennung und Korrektur von Montagefehlern erleichtert. Sie folgern daraus, dass das Optimum der Informationsdichte je nach Umfang und Komplexität der Tätigkeiten mit der gleichzeitigen Anzeige von zwei bis drei Arbeitsschritten erreicht werden kann. Eine Methode zur objektiven Bewertung der kognitiven Last bei Montagetätigkeiten mittels Elektroenzephalographie (EEG) demonstrieren *Kosch et al.* [143]. Ihr Verfahren wenden sie zur Evaluierung projektionsbasierter Assistenzsysteme an und zeigen, dass diese eine geringere kognitive Last als papierbasierte Montageanweisungen verursachen.

Aus einer Untersuchung von Intuition, musterbasiertem Verhalten und motivationspsychologischen Aspekten im Montageumfeld leiten *Mattsson und Fast-Berglund* einige Richtlinien für die Gestaltung von Assistenzsystemen und die Darstellung von Montageinformationen ab [144]. Laut ihrer Analyse fördern Aufgaben unter bestimmten Voraussetzungen die Motivation, Kreativität und Leistungsbereitschaft der Mitarbeiter und ermöglichen es ihnen einen Zustand der Vertiefung und positiver Emotion (engl. *flow state*) zu erreichen. Dies ist der Fall, wenn der Tätigkeit eine klare Zielsetzung zugrunde liegt, sich das Ergebnis durch den Werker beeinflussen lässt, von dessen Fähigkeiten abhängt, sich diese Fähigkeiten steigern lassen und eine möglichst unmittelbare Rückmeldung zur Arbeitsleistung gegeben wird. Für die Darstellung empfehlen sie die Informationsmenge auf wesentliche Elemente zu reduzieren und an die jeweiligen Bedürfnisse und Erfahrung des Nutzers anzupassen (Adaptivität), klare Beschreibungen und eindeutige Symbole zu nutzen, grafische / bildliche Darstellungen zu bevorzugen und die Benutzeroberfläche einheitlich und übersichtlich zu strukturieren.

Die Vorteile von grafischen Darstellungen, Animationen und Videos gegenüber textuellen Beschreibungen betonen auch *Lušić et al.* [41; 145]. Möglichkeiten zur Illustration von Bewegungen und kinematischen Zusammenhängen beschreiben *Mitra et al.* [146]. *Loch et al.* stellen die videobasierte Montageinstruktion der animierten Darstellung mittels monitor-basierter *augmented-reality* gegenüber [147]. In ihrer Untersuchung konnten sie keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Arbeitsleistung und der subjektiven Wahrnehmung der mentalen Belastung bzw. der Nutzerfreundlichkeit nachweisen, lediglich bei der Zahl der Montagefehler zeigte sich ein geringfügiger Vorteil bei der AR-basierten Darstellung.

Eng verbunden mit der Darstellungsform ist die Auswahl geeigneter Informationsträger bzw. Anzeigegeräte. In der Praxis sind trotz ihrer Nachteile nach wie vor papierbasierte Montageinformationen weit verbreitet, in vielen Bereichen wurden sie mittlerweile durch monitorbasierte Systeme ersetzt oder ergänzt. Monitore zählen im Industrieumfeld heute zu den Standardlösungen, da die Technik ausgereift, kostengünstig und flexibel einsetzbar ist. Sie erlauben die

Darstellung verschiedenster Inhalte, von einfachen textuellen Beschreibungen Symbolen und Farben bis hin zu komplexen 3D-Inhalten, Videos und Animationen. Die Nutzung von einfachen Symbolen für die Informationsübermittlung bietet sich insbesondere bei Variantenanzeigen mit geringer Varianz an, oder für Systeme die keine komplexere Visualisierung erlauben, wie mobile Geräte mit kleinem Display oder Projektionen in den Arbeitsraum.

Bei der Materialbereitstellung werden zunehmend Signalleuchten (*pick-by-light*) oder kleine Displays (e-Paper Technologie) direkt an den Behältern eingesetzt. *Stork und Schubö* untersuchten verschiedene Darstellungsformen für Kommissionieraufträge und konnten, bei auf dieser Weise in räumlicher Nähe zum aufzunehmenden Objekt angezeigten Information, einen Produktivitätsvorteil gegenüber der Darstellung auf einem zentral angeordneten Monitor nachweisen [148]. Mobile Bildschirmgeräte wie Smartphones, Tablets oder PDAs eignen sich in der Automobilproduktion primär für Aufgaben aus dem Bereich der Logistik und der Qualitätskontrolle. Ihre Einsatzmöglichkeiten in der Montage sind bislang gering und auf komplexere Arbeitsabläufe in der Unikat- und Kleinserienproduktion beschränkt, für die Serienmontage unter hohem Zeitdruck eignen sie sich aufgrund der relativ komplexen Bedienung weniger. *Thorvald et al.* diskutieren entsprechende Anwendungsfälle und belegen den positiven Effekt mobiler Informations- und Assistenzsysteme auf die Produktqualität [149; 150].

Zahlreiche Veröffentlichungen beschäftigen sich mit stationären, projektionsbasierten Systemen (beispielsweise [151–155]) sowie mobilen, mittels körpergetragener Geräte realisierten AR-Anwendungen (beispielsweise [156; 157]). *Büttner et al.* [158] stellen die beiden Ansätze gegenüber und attestieren den Datenbrillen (engl. *smart-glasses* oder auch *head-mounted displays* genannt) aktuell eine geringe Industrietauglichkeit, die sie in großen Teilen auf die Schwächen dieser noch unausgereiften Technologie zurückführen. Um bei AR-Anwendungen eine Überlagerung realer Objekte mit Animationen zu ermöglichen, ist eine akkurate Positionierung erforderlich. Diese ohne entsprechende Marker zu erreichen stellt aktuell einen Schwerpunkt im Bereich der AR-Forschung dar (vgl. [159; 160]). Für projektionsbasierte Systeme vergleichen *Funk et al.* verschiedene Darstellungsmöglichkeiten und zeigen anhand einer Studie mit kognitiv beeinträchtigten Probanden, dass die Visualisierung durch Piktogramme und einfache Konturen zu der besten Arbeitsleistung führt [108]. *Renner und Pfeifer* evaluieren einige Möglichkeiten für die Annotation von Montageabläufen in AR-Systemen [161].

Vereinzel lassen sich Beiträge identifizieren, die auf eine haptische bzw. taktile oder akustische Informationsübermittlung eingehen. Die häufigste Anwendung derartiger Systeme liegt in der Übermittlung von Feedback an den Werker, etwa einer positiven Bestätigung oder einer Fehlermeldung. Beispielsweise schlagen *Wang et al.* zur Ergänzung AR-basierter Systeme ein Vibrationsarmband vor [160]. *Funk et al.* bewerteten verschiedene akustische, haptische und visuelle Ansätze für die Fehlermeldung hinsichtlich der Ablenkung und Akzeptanz durch die Anwender [162]. Laut ihrer Studie wird akustisches Feedback als invasiver und unangenehmer empfunden als eine visuelle oder haptische Rückmeldung. Eine Auswirkung der Feedback-Übermittlung auf die Fehlerrate konnten *Kosch et al.* in einer Folgestudie mit kognitiv beeinträchtigten Probanden nicht nachweisen [163]. Kaum Erwähnung finden in der untersuchten wissenschaftlichen Literatur sprachbasierte Systeme (engl. *pick-by-voice*). Einen Überblick über die diversen Ansätze und Kombinationsmöglichkeiten geben *Lušić et al.* [164].

In **Tabelle 10** sind die hier diskutierten Optionen zur Informationsübermittlung zusammengefasst und hinsichtlich ihrer Eignung für bestimmte Inhalte bzw. Darstellungsformen bewertet.

Insbesondere im Hinblick auf die Ansätze und Konzepte zur Nutzung von AR-Systemen ist anzumerken, dass die publizierten Studien fast ausschließlich in Laborumgebungen unter kontrollierten Bedingungen mit einfachen Montagetätigkeiten und geringer Probandenzahl durchgeführt wurden. Die Eignung derartiger Systeme für den produktiven Einsatz in einer realen Industrieumgebung scheint daher aktuell zweifelhaft, zumindest ist sie nicht als erwiesen anzusehen.

| | | Informationsträger / Anzeigegerät | | | | | | | | |
|--|--|-----------------------------------|--------|--------------------------------|-------------------------|--------------|------------------|----------------|----------------------|--------------------------|
| | | Mensch (Gespräch) | Papier | Montageobjekt / Betriebsmittel | Signalleuchte / Display | Lautsprecher | Monitor | Projektor | Head-mounted Display | Mobile / Wearable Device |
| Inhalt / Darstellungsform / Kodierung | Akustisch / Verbal | X | | | | X | X ¹ | | X ¹ | X ¹ |
| | Taktil / haptisch | | | X | | | | | | X |
| | Textuelle Beschreibung | | X | (X) | (X) | | X | (X) | X | X |
| | einfache Symbole / Markierungen | | X | X | X | | X | X | X | X |
| | Komplexere Darstellungen / Bilder | | X | | | | X | (X) | X ² | X ² |
| | Dynamische Inhalte (Animationen, Videos) | | | | | | X | (X) | X ² | X ² |
| | Interaktive Darstellungen | | | | | | X | (X) | X ² | X ² |
| | Räumliche Darstellung / Überlagerung der physischen Umgebung (Augmented Reality) | | | | | | (X) ³ | X ³ | X | (X) |
| () Teilweise / in begrenztem Umfang ¹ Entsprechende Geräte verfügen in der Regel über integrierte Lautsprecher ² Abhängig von der Bildschirmgröße und Auflösung ³ In Kombination mit Sensorik / Kameras für die Erfassung der Umwelt und / oder Positionsbestimmung | | | | | | | | | | |

Tabelle 10: Die Eignung von Informationsträgern für Inhalte und Darstellungsformen

Cluster 4 - Sensorik und Überwachung des Montageablaufs, Bedienung und Interaktion

Um situationsbezogene und interaktive Assistenzfunktionen realisieren zu können, umfassen viele Konzepte neben den Anzeigegeräten auch Sensorik für die Erfassung von Nutzereingaben und die Überwachung des physischen Prozesses sowie Aktorik zur Manipulation des Montageumfelds.

Paelke und Röcker untersuchten verschiedene Bedienkonzepte für cyber-physische Montagesysteme und leiten aus ihren Versuchen einige allgemeine Anforderungen ab [165]. Zunächst stellen sie fest, dass sich aufgrund der zunehmenden Verbreitung mobiler und webbasierter Applikationen im privaten Umfeld die Erwartungshaltung bei den Anwendern auch im industriellen Umfeld gewandelt hat und heute neben der reinen Funktionalität auch das Nutzererlebnis im Vordergrund steht. Um eine hohe Nutzerfreundlichkeit und damit auch Akzeptanz bei den Anwendern zu erreichen, ist es ihren Beobachtungen zufolge notwendig, die Technologie für die Interaktion individuell für das jeweilige Montageumfeld zu wählen. In diesem Kontext bemängeln sie das Fehlen geeigneter Standards und Schnittstellen, die es ermöglichen unterschiedliche Hardware für die Nutzereingabe nach dem Baukastenprinzip flexibel zu kombinieren und leiten daraus einen Forschungsbedarf ab. Abschließend raten sie dazu, neue Technologien wie AR-Systeme weniger als Ersatz denn als Ergänzung zu etablierten Systemen zu sehen und sie basierend auf ihren Stärken gezielt einzusetzen.

Neben etablierten Interaktionskonzepten, wie physischen Bedienelementen (Taster, Schalter, Hebel, Drehknöpfe, etc.) und berührungsempfindlichen Bildschirmen (engl. Touch-Screens), sind für Anwendungen in der manuellen Montage insbesondere Systeme interessant, die eine Freihand-Bedienung erlauben. Einige Arbeiten widmen sich daher der Entwicklung geeigneter Gestenerkennungssysteme, mittels körpergetragener Sensorik in digitalen Armbändern oder Armbanduhren (engl. *smart-watches*, vgl. [166]) oder kamerabasiert (z.B. [160; 167; 168]).

Um die Montageeffizienz zu maximieren, ist es zweckmäßig die notwendige Interaktion auf ein Minimum zu reduzieren. Anstelle einer manuellen Eingabe zur Quittierung einer Montagetätigkeit wird daher versucht Systeme zu entwickeln, die in der Lage sind den Montagefortschritt visuell mittels Objekt- und Lageerkennung selbstständig zu bestimmen (vgl. [169–171]). *Kaczmarek et al.* beschreiben ein visuelles System, das beide Ansätze, die automatische Fortschrittsbestimmung und die Gestenerkennung vereint [172]. Da derartige visuelle Systeme nicht alle Aspekte einer Montagesituation erfassen können, ist es zweckmäßig ihre Daten mit denen vernetzter Werkzeuge zu kombinieren. Schraubsysteme, welche die korrekte Ausführung einer Verschraubung erkennen und dokumentieren können sind in der Serienmontage bereits seit Jahren etabliert und werden dort insbesondere für sicherheitskritische Schraubverbindungen (beispielsweise Air-Bags) eingesetzt. Ihre Daten zu nutzen, um die Fertigstellung eines Montageschritts zu erkennen ist naheliegend. Um die Einhaltung einer bestimmten Schraubreihenfolge sicherzustellen, können sie mit Systemen zur Bestimmung der Werkzeugposition kombiniert werden. *Fischer et al.* beschreiben ein entsprechendes, auf Radar-Technik basierendes System [173], auch ultraschall- oder kamerabasierte Lösungen werden in der Literatur für diese Anwendung diskutiert.

Für die Erkennung von Komponenten und Bauteilen bietet sich die RFID-Technik an, wie beispielsweise *Zhang et al.* [174] demonstrieren. *Mura et al.* beschreiben die Nutzung von Kraftsensoren in der Arbeitsfläche, um über die Gewichtsänderung die Entnahme von Bauteilen aus einem Behälter oder die Positionierung in einem bestimmten Bereich zu erkennen [175]. Durch die Integration von Sensoren in Werkstückträger und -Aufnahmen lassen sich ebenfalls Daten zur Montagesituation erfassen. *Ruppert und Abonyi* demonstrieren ein entsprechendes Konzept für die Kabelbaumfertigung und gehen dabei auch auf die Herausforderungen bei der Kombination verschiedener Sensordaten (engl. *sensor-fusion*) ein [176].

Eine weitere mögliche Anwendung von Sensorik in der manuellen Montage liegt in der Überwachung des Werkers, beispielsweise um ihn auf Optimierungspotenziale wie kürzere Wege oder ergonomisch günstigere Haltungen hinweisen zu können (vgl. [177]). *Di Valentin et al.* beschreiben ein entsprechendes Feedback-System für die Arbeitsergonomie basierend auf körpergetragener Sensorik [178]. *Bortolini et al.* nutzen für die selbe Zielsetzung ein Kamerasystem [82]. Derartige Systeme lassen sich auch für die Messung der Ausführungszeiten und damit der Montageleistung nutzen (vgl. [179; 180]). Neben der Bewegung können auch physiologische Parameter erfasst werden, etwa um das Stress-Level zu bestimmen oder Anzeichen von Müdigkeit zu erkennen (vgl. [181]). Da mangelnde Konzentration zu Fehlern und Ausschuss führen kann, scheint es zwar aus ökonomischer Perspektive sinnvoll diese Daten zu erheben, um frühzeitig Gegenmaßnahmen wie eine Arbeitsplatzrotation ergreifen zu können. Da diese Datenerfassung jedoch sehr stark in die Privatsphäre der Werker eindringt sind derartige Anwendung sowohl ethisch wie auch rechtlich fragwürdig, wie *Provost et al.* [182, S. 108] erläutern.

Bei der überwiegenden Anzahl der untersuchten Arbeiten zur Anwendung von Sensorik in der Montage handelt es sich, ebenso wie bei den Publikationen zu Anzeigegeräten, mehr um frühe Konzepte und limitierte Experimente unter Laborbedingungen als um umfassende, praxisnahe Studien.

Cluster 5 - Architektur und Implementierung

Hilfestellungen für die konkrete informationstechnische Implementierung von Assistenzsystemen sind in der betrachteten Literatur kaum zu finden. Einige Beiträge beschreiben jedoch zumindest auf hoher Abstraktionsebene entsprechende Systemarchitekturen.

Für die Entwicklung hybrider Produktionssysteme, die sowohl automatisierte Stationen wie auch manuelle, kognitiv unterstützte Montagearbeitsplätze umfassen, beschreiben *Colombo und Jammes* auf recht abstrakter Ebene eine service-orientierte, verteilte Architektur [183]. In ihrem Konzept besteht das Gesamtsystem aus vielen mehr oder weniger komplexen, vernetzten jedoch unabhängigen Subsystemen, die Kontroll- und Automatisierungsfunktionen über standardisierte *Web-Services* (*Device Profile for Web services* DPWS, Konkurrenz bzw. Alternative zum heute in der Automatisierungstechnik weiter verbreiteten *Open Plattform Communications Unified Architecture* OPC-UA Standard) bereitstellen. Dabei kann ein Subsystem entweder atomare Funktionen bereitstellen, oder wiederum aus mehreren unterlagerten Einheiten bestehen, deren Dienste es bündelt (auch als *Orchestration* bezeichnet). Für die Integration von älteren Komponenten (engl. *legacy devices*) schlagen sie die Nutzung entsprechender *Middleware* vor, die das proprietäre Protokoll des jeweiligen Systems konvertiert und

nach außen hin standardisierte *Web-Services* bereitstellt. Die einzelnen autonomen Komponenten zur Zusammenarbeit und Verfolgung eines gemeinsamen Ziels nach einer möglichst optimalen Strategie zu bewegen, identifizieren sie als zentrale Herausforderung. In ihrer beispielhaften Implementierung erreichen sie dies, indem das Werkstück oder Montageobjekt selbst als Informationsträger agiert, einen Arbeitsplan zu seiner Bearbeitung enthält und diesem entsprechend die Dienste der Komponenten beansprucht.

Eine konkretere, speziell für die Anforderungen von Montageassistenzsystemen entwickelte Architektur schlagen *Quint et al.* [184] vor. Sie soll es ermöglichen Assistenzfunktionen plattformübergreifend über vielfältige Anzeige- und Endgerätetypen bereitzustellen, diverse Sensorik und Betriebsmittel flexibel zu integrieren und auch nachträglich aufwandsarm Änderungen und Erweiterungen realisieren zu können. Montageaufgaben modellieren sie ebenso wie Wartungsarbeiten als sequentielle Abfolge standardisierter Tätigkeiten in einem *Entity-Relationship*-Diagramm. Jede Tätigkeit umfasst in ihrem Modell genau eine Aktivität, ein Objekt sowie optional ein oder mehrere Werkzeuge bzw. Betriebsmittel. Um eine Visualisierung mittels dreidimensionaler Geometrien zu ermöglichen, ist jedem Objekt in jedem Schritt eine Position im Raum (Translation und Rotation der Basisgeometrie in X-, Y- und Z-Richtung) zugeordnet. Für ihre ereignis-getriebene Architektur (schematisch dargestellt in **Abbildung 26**) nutzen sie diverse Erkennungsmechanismen (engl. *Trigger*), wie eine kamerabasierte Bewegungserfassung, die bei einer Änderung der Montagesituation Daten über einen *Messaging Server* an eine zentrale Komponente mit dem Arbeitsplan senden. Diese zentrale Komponente berechnet dann den aktuellen Montagezustand (engl. *State*), ermittelt die nächste auszuführende Aktivität und übermittelt diese Daten wiederum über den *Messaging Server* an die Endgeräte, welche dem Werker über gerätespezifische Ansichten (engl. *Views*) die Informationen in Form von Texten, Bildern oder Animationen anzeigen.

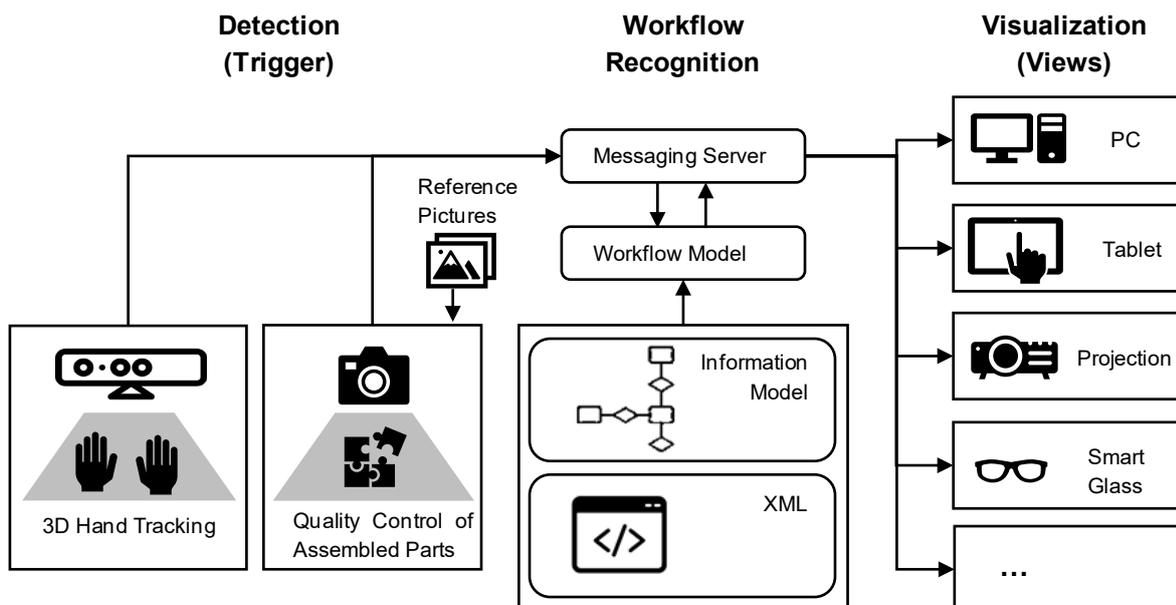


Abbildung 26: Systemarchitektur für Montageassistenzsysteme nach Quint et al. [184, S. 48]

Wie sich das System adaptiv im Sinne einer Anpassung an anwenderspezifische Bedürfnisse gestalten lässt, eine Anbindung an übergeordnete Systeme realisiert oder wie Daten aus dem Assistenzsystem persistiert, ausgewertet und mit anderen Systemen geteilt werden könnten, beschreiben die Autoren jedoch nicht. Auch gehen sie nicht darauf ein, wie die Daten der verschiedenartigen Erkennungsmechanismen ausgewertet bzw. die Anzeigen für die unterschiedlichen Endgerätetypen erzeugt werden können. Um auf Basis dieses Konzepts ein reales System für den praktischen Einsatz implementieren zu können, muss es daher entsprechend erweitert und detailliert werden.

3.2.3 Zusammenfassung

Um einen möglichst reibungsfreien An- und Hochlauf sowie letztlich eine robuste und effiziente Serienproduktion zu ermöglichen, müssen während der Serienentwicklung sowohl Produkt- wie auch Produktionskonzept umfassend getestet und iterativ optimiert werden. Dabei muss der Entwicklungfortschritt laufend überprüft werden, indem die erreichte Reife gemessen und den Entwicklungszielen gegenübergestellt wird. Mit der stetig zunehmenden Produktvarianz und -Komplexität aber auch den neuartigen Fertigungs- und Montagekonzepten wird diese Aufgabe laufend anspruchsvoller. Bei der Definition einer Absicherungsstrategie müssen Methoden ausgewählt und Betrachtungsgegenstand, -Umfang sowie die zeitliche Verortung im Entwicklungsprozess definiert werden.

Die Analyse der Literatur zeigt, dass es insbesondere im Hinblick auf die produktionsbezogene Prozessabsicherung und die Ressourcenabsicherung sowohl an einem geeigneten Reifegradmodell wie auch einer übergeordneten Methodik für die systematische Absicherung und Bewertung der Reife fehlt, welche die aktuellen technischen Möglichkeiten berücksichtigt und gezielt einsetzt.

Auch Methoden für die Absicherung montagerelevanter Aspekte an Hardware in der Prototypen- und Vorserienproduktion lassen sich in der Literatur nicht finden. Lediglich die gängige, wenngleich suboptimale Praxis der Absicherung im Rahmen von Expertenworkshops wird in einigen Beiträgen erwähnt. Die Abteilungs- und Domänenübergreifende Kommunikation scheint bei der Absicherung sowohl vertikal zwischen Entwicklung, Planung und Shopfloor wie auch horizontal zwischen Vorserien- und Serienmontage eine Herausforderung darzustellen. Für eine schnelle und effiziente Serienentwicklung stellt dies einerseits im Rahmen des Problemmanagements und andererseits beim Wissenstransfer in die Serie sowie dem Feedback in die Planung und Entwicklung ein Hindernis dar. In der Praxis führen die dargestellten Defizite bei der Absicherung in vielen Projekten zu kostenintensiven und zeitaufwändigen Änderungen spät im Entwicklungsprozess. Vor dem Hintergrund veränderter Kernkompetenzen, verkürzter technologischer Innovationszyklen und zunehmendem Wettbewerb ist es daher naheliegend die Absicherung unter Nutzung moderner informationstechnischer Systeme zu optimieren.

Die auch in absehbarer Zukunft essentielle Bedeutung der menschlichen Arbeitskraft für die industrielle Montage wird in der Literatur ausführlich dargelegt. Im Kontext der Digitalisierung und der Industrie 4.0 werden daher weniger Konzepte für eine vollständige Automatisierung denn hybride Ansätze diskutiert, welche danach streben die Vorteile der Automatisierungs-

technik mit der Flexibilität des Menschen zu kombinieren. Informations- und Assistenzsysteme ermöglichen es in diesen Konzepten den Menschen auf dem Shopfloor in die komplexen Abläufe und Informationsflüsse der digitalen Fabrik einzubinden. Neben der Beherrschung der stetig zunehmenden Komplexität liefern zahlreiche Studien weitere Gründe, die für den Einsatz von Assistenzsystemen in der Montage sprechen, wie gesteigerte Produktivität und höhere Qualität.

Die Forschung im Bereich der Assistenzsysteme für manuelle Montagetätigkeiten thematisiert vielfältige Anwendungsbereiche in verschiedensten Industriezweigen, von Wartungs- und Reparaturarbeiten über die Unikat- und Kleinserienproduktion bis hin zur Serienmontage. Jedoch konnten keine Arbeiten identifiziert werden, die sich konkret der Serienentwicklung mit der Prototypen- und Vorserienmontage widmen und auf die spezifischen Anforderungen dieser Phasen sowie mögliche Synergien eingehen.

Lediglich zwei Beiträge der untersuchten Literatur thematisieren Möglichkeiten einen Informationsfluss aus dem Shopfloor zurück in die Produktentwicklung und Planung zu realisieren, wie er zur Unterstützung der Absicherungs- und Optimierungsprozesse in diesen Phasen erforderlich wäre. *Müller et al.* demonstrieren ein System zur Digitalisierung von handgeschriebenen Anmerkungen auf papierbasierten Arbeitsanweisungen oder Konstruktionszeichnungen, welches beispielsweise genutzt werden kann, um Defizite, Abweichungen oder Optimierungsvorschläge zu dokumentieren [185]. Für eine effizientere Qualitätssicherung schlagen *Fischer et al.* die Integration einer auf Textbausteinen basierenden Feedback-Funktion in ein Assistenzsystem vor [186]. In ihrer Arbeit konzentrieren sie sich primär auf die Produktqualität, erwähnen jedoch am Rande auch die Möglichkeit eine derartige Funktionalität für die Steigerung der Informationsqualität, beispielsweise die Korrektheit und Vollständigkeit der Montageanweisungen zu nutzen.

Die Berichte aus dem praktischen Einsatz von Assistenzsystemen legen allesamt nahe, dass entsprechende Lösungen aufgrund der komplexen und individuellen Anforderungen anwendungsspezifisch zu entwickeln sind und Standardlösungen nur sehr bedingt eingesetzt werden können. Die wenigen verfügbaren methodischen Hilfestellungen für den Entwurf und die Entwicklung beschränken sich jedoch auf abstrakte Vorgehensmuster zur Identifikation des Assistenzbedarfs und der allgemeinen Anforderungen an entsprechende Lösungen.

Hinsichtlich der zugrundeliegenden (Daten-) Modelle und der Generierung der Inhalte konzentrieren sich die untersuchten Arbeiten jeweils auf einzelne Aspekte wie beispielsweise die Adaptivität im Sinne der Anpassung an die jeweiligen Anwender oder die Nutzung von 3D Geometrien (insbesondere im Kontext von AR-Anwendungen). Ein übergreifendes Modell, das Produktentwicklung und Konstruktion, Montageplanung und den Shopfloor umfasst lässt sich hingegen nicht finden.

Bei dem überwiegenden Teil der betrachteten Arbeiten im Bereich der Informationsübermittlung (insb. AR) und Sensorik handelt es sich um frühe Konzepte, die bislang lediglich unter Laborbedingungen evaluiert wurden und deren Einsatz in der Praxis noch umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeit voraussetzt.

3.3 Zwischenfazit und Forschungsfragen

Die Herausforderungen und Defizite bei der Planung, Evaluierung und Optimierung von Montagesystemen in der industriellen Praxis wurden im Abschnitt 3.1 ausführlich beleuchtet. Die im letzten Abschnitt beschriebene Literaturrecherche hat aufgezeigt, dass die Absicherung von Montageprozessen im Rahmen der Montage von Prototypen und Vorserienfahrzeugen während der Serienentwicklung in der Forschung sowohl aus methodischer Sicht wie auch aus dem Blickwinkel der Nutzung von Assistenzsystemen bislang wenig Aufmerksamkeit erfahren hat. Die vorliegende Arbeit verfolgt daher das Ziel, Möglichkeiten für die Prozessabsicherung und die Ressourcenabsicherung in dieser Phase zu untersuchen und dabei insbesondere die Anwendbarkeit von Assistenzsystemen zu betrachten.

Aus dieser übergeordneten Zielsetzung wurden die folgenden Fragestellungen abgeleitet, die im Rahmen dieser Arbeit beleuchtet werden sollen:

- 1) Wie kann die produkt- und produktionsbezogene Prozessabsicherung und die Ressourcenabsicherung während der Prototypen- und Vorserienmontage gestaltet werden?

Dabei soll zunächst diskutiert werden, welche Optionen aus methodischer Sicht existieren (beispielsweise hinsichtlich Betrachtungsgegenstand, Betrachtungsumfang, Format) und welche Aspekte der Serienmontage aussagekräftig abgebildet und evaluiert werden können. Anschließend wird dargestellt, wie die Messung der Reife und des Absicherungsgrades erfolgen kann. Bei der Betrachtung ist auch zu berücksichtigen, wie sich die Absicherung im Prototypenbau mit anderen Absicherungsmaßnahmen im Serienentwicklungsprozess zu einer übergeordneten Absicherungsstrategie kombinieren lässt.

- 2) Wie kann ein Assistenzsystem die Absicherung in der Prototypenmontage unterstützen?

Aufbauend auf den Ausführungen zur ersten Fragestellung ist zu bewerten, welche Möglichkeiten ein Montageassistenzsystem für die Absicherung bieten kann und für welche Bewertungen in welchem Kontext der Einsatz plausibel erscheint. Weiterhin soll untersucht werden, ob, bzw. wie die Bewertung der Montageprozesse im Zusammenhang mit einem Assistenzsystem durch Sensorik und Datenerfassung unterstützt und die Transparenz im Absicherungsprozess gesteigert werden kann.

Das Kapitel vier widmet sich diesen beiden Fragestellungen mit dem Ziel eine Methode für die Montageprozessabsicherung im Prototypenbau zu entwerfen, welche die Möglichkeiten eines für diesen Anwendungsfall optimierten Montageassistenzsystems berücksichtigt. Ein Grobkonzept für die Methode und das, sie stützende technisch System soll das Ergebnis dieses Kapitels darstellen.

- 3) Wie muss ein Montageassistenzsystem gestaltet sein, damit es sich für den Einsatz in der Prototypenmontage eignet und welche Voraussetzungen müssen (insb. im Hinblick auf die Datenverfügbarkeit und -Qualität) gegeben sein bzw. wie können diese geschaffen werden?

Als Voraussetzung für die tatsächliche Entwicklung und Implementierung eines Assistenzsystems muss zunächst geklärt werden, welche Anforderungen eine derartige Lösung im geplanten Einsatzbereich zu erfüllen hat. Für die daraus abgeleiteten Herausforderungen sollen Lösungsmöglichkeiten generiert und zu einem Gesamtkonzept kombiniert werden. Anschließend ist zu klären, wie die benötigten Rahmenbedingungen geschaffen werden können und die wesentlichen Bestandteile müssen ausgearbeitet werden. Im fünften Kapitel wird diese Fragestellung bearbeitet.

Die auf Basis theoretischer Überlegungen, der Literatur und den Beobachtungen aus der Praxis erarbeiteten Antworten und Konzepte müssen natürlich hinsichtlich ihres Zutreffens bzw. ihrer praktischen Eignung überprüft werden. Die prototypische Implementierung eines entsprechenden Assistenzsystems ermöglicht die Anwendung und Validierung der Methode im Rahmen einer Fallstudie. Die Umsetzung wird in Kapitel sechs beschrieben, die Evaluation wird im siebten Kapitel vorgestellt. Abschließend werden im achten Kapitel die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und diskutiert.

4 Konzeption einer Methode zur Absicherung von Serienmontageprozessen im Prototypenbau

Als Basis für die Konzeption einer konkreten Absicherungsmethode wird in diesem Kapitel zunächst betrachtet, welche Gestaltungsmöglichkeiten und -freiräume bei der Absicherung im Rahmen der Prototypenmontage und der nachgelagerten Vorserienproduktion existieren. Um eine systematische Vorgehensweise bei der Prozessvalidierung zu ermöglichen und Transparenz zum Fortschritt geben zu können, sollte die Methode einen laufenden Ist-Soll-Abgleich ermöglichen. Als Grundlage dafür wird der Begriff des Reifegrads vorgestellt und seine Messung diskutiert.

Um den Betrachtungsbereich der Methode abgrenzen und eine Zielsetzung formulieren zu können, erfolgt anschließend eine umfassende Analyse der abzusichernden Aspekte und Prozesseigenschaften sowie ihrer Abhängigkeiten. Darauf aufbauend werden Aspekte und Eigenschaften ausgewählt, welche für eine Absicherung im Rahmen des Prototypenbaus grundsätzlich geeignet erscheinen. Anschließend wird untersucht, wie die Arbeit in der Prototypenmontage und insbesondere die Absicherung der Montageprozesse hinsichtlich der gewählten Aspekte und Eigenschaften durch Assistenzsysteme unterstützt werden kann.

In Verbindung mit den im 3. Kapitel identifizierten Praxisdefiziten werden daraus Lösungshypothesen formuliert und Erfolgskriterien definiert. Die Vorstellung eines Grobkonzepts der Absicherungsmethode und des sie unterstützenden technischen Systems bildet den Abschluss dieses Kapitels und die Grundlage für die detaillierte Ausarbeitung im nächsten Kapitel.

4.1 Gestaltungsmöglichkeiten bei der Absicherung und Messung des Reifegrades in der Serienentwicklung

Wie bereits erläutert, werden Absicherungsmaßnahmen häufig anhand des Betrachtungsgegenstandes unterschieden. Dabei bestehen im Wesentlichen folgende Optionen: Digitale 3D-Modelle, physische Design-Modelle (engl. *mock-ups*), Funktionsmodelle, Teilaufbauten und Gesamtfahrzeuge.

Im Prototypenbau stehen seriennahe Gesamtfahrzeugprototypen im Mittelpunkt, wobei eine Unterscheidung hier anhand der Seriennähe und Qualität der Bauteile vorgenommen werden kann. Bei frühen Prototypen kommen weitgehend Vorserienbauteile aus Ersatzmaterialien zum Einsatz, welche noch eine schlechte Passgenauigkeit aufweisen, häufig Konstruktionsfehler enthalten und hinsichtlich des Materialverhaltens von den späteren Serienteilen abweichen. Funktionsbauteile wie Steuergeräte, welche für den geplanten Erprobungszweck nicht zwingend erforderlich sind, werden zur Kosteneinsparung üblicherweise durch funktionslose Attrappen ersetzt.

In der Endphase der Serienentwicklung stammen die Komponenten für die Prototypen hingegen bereits überwiegend aus den Serienwerkzeugen (daher auch „serienfallende Teile“ genannt) und entsprechen den später in der Serie verwendeten weitestgehend. Hinsichtlich des Produkts hängt der Betrachtungsgegenstand in dieser Phase daher eng mit der zeitlichen Verortung einer Absicherungsmaßnahme zusammen.

Je später eine Evaluierung erfolgt, umso weiter ist die Entwicklung fortgeschritten und desto detaillierter sind die Montageabläufe ausgeplant. Entsprechend aussagekräftiger sind die Ergebnisse. Gleichzeitig sinken mit zunehmendem Entwicklungsfortschritt die Möglichkeiten Änderungen noch ökonomisch sinnvoll zu realisieren. Auch das Montageumfeld ist von der zeitlichen Verortung abhängig: Während die Montage der Prototypen meist in einem eigenen, eher werkstattähnlich organisierten Bereich erfolgt, werden die Fahrzeuge der Vor- und Nullserie in der Regel bereits auf der Serienmontagelinie produziert. Teilweise verfügen die Automobilunternehmen auch über eigene Pilotwerke, in deren seriennahem Umfeld Fahrzeuge aufgebaut und Prozesse abgesichert werden können. Im Hinblick auf die zeitliche Verortung können drei Arten von Absicherungsmaßnahmen unterschieden werden: Zeit-diskrete Formen wie einmalig stattfindende Prüfungen, wiederholt durchgeführte Evaluierungen sowie die kontinuierliche, produktionsbegleitende Absicherung. In **Abbildung 27** sind die Projektphasen, die genannten Absicherungsarten sowie die Entwicklung der Reife schematisch dargestellt.

Wenngleich das Reifegradmanagement als Instrument der Termin-, Aufwands- und Sachfortschrittskontrolle im Bereich des Projektmanagements verbreitet ist, fehlt insbesondere im Kontext der Produkt- und Prozessentwicklung eine eindeutige Definition des Begriffs der Reife [58, S. 37]. Bei einem Fahrzeugprojekt stehen meist ökonomische Motive im Vordergrund. Auf Basis von Prognosen zum Absatz und erzielbaren Preisen werden im Rahmen des Strategieprozesses Zielsetzungen abgeleitet. Der Erfolg eines Fahrzeugprojekts kann im Wesentlichen daran gemessen werden, ob es gelingt unter Einhaltung der vorgegebenen Entwicklungszeit und -kosten ein Produkt zu entwickeln, das die geforderten Eigenschaften (z.B. Gestalt, technische Parameter, Funktionalität) aufweist und ein Produktionssystem zu realisieren, das es ermöglicht die geplanten Stückzahlen dieses Produkts in der geforderten Qualität und unter Einhaltung regulatorischer Vorgaben (z.B. Arbeits- und Umweltschutz) zu den veranschlagten Herstellkosten zu produzieren.

Eine abschließende Bewertung ist somit erst nach dem Produktionshochlauf möglich, wenn die geplante Produktionskapazität erreicht ist bzw. sich abzeichnet, dass sie nicht erreicht wird und die Einhaltung des Kostenrahmens geprüft werden kann. In dieser Arbeit wird unter dem Reifegrad in der Serienentwicklung daher der Grad verstanden, zu dem ein Entwicklungsstand domänenübergreifend die zum Ende des Hochlaufs geforderten Eigenschaften erfüllt (vgl. „Ziel-Reifegrad zum Projektende“ in **Abbildung 27**). Ein Reifegrad von 100% würde bedeuten, dass sämtliche Umfänge aller Produktvarianten wie auch alle Elemente des geplanten Produktionssystems die gestellten Anforderungen vollständig erfüllen.

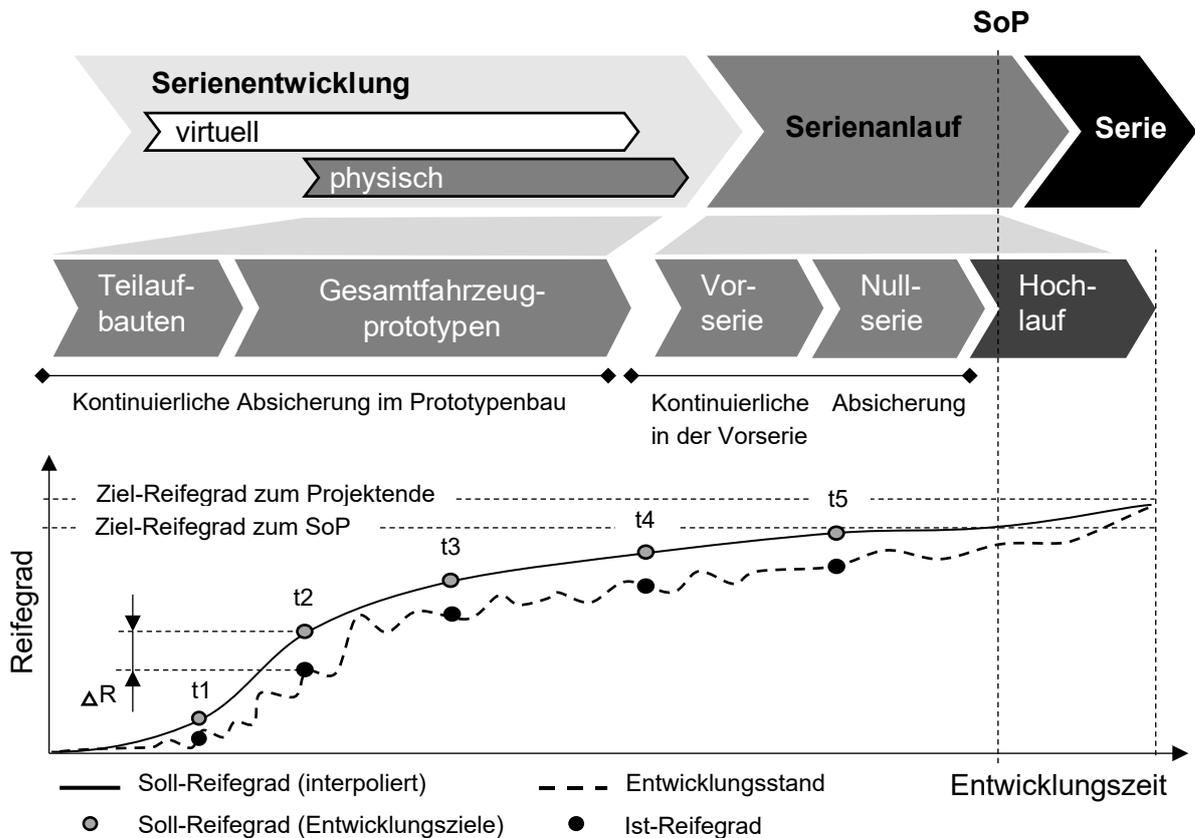


Abbildung 27: Schematische Darstellung der Entwicklungsphasen, Absicherungsformen und des Reifegrades (i.A.a. [58, S. 84; 187, S. 86])

Dabei ist zu beachten, dass die Voraussetzungen, welche für eine reibungslose Serienproduktion eines qualitativ und funktional einwandfreien Produktes unter den vorgegebenen Rahmenbedingungen erfüllt sein müssen, in der Praxis nie vollständig spezifiziert (beispielsweise in Form eines Lastenhefts) vorliegen. Entsprechend wäre selbst ein Reifegrad von 100 % kein Garant für das gewünschte Entwicklungsergebnis, da wesentliche Aspekte bei der Sammlung der Anforderungen übersehen worden sein könnten. Aufgrund dieser Unschärfe bei der Anforderungsdefinition, unzutreffender Prognosen oder veränderter Rahmenbedingungen, welche den Markt und das Käuferverhalten beeinflussen, ist die Einhaltung der Entwicklungsvorgaben weder hinreichend noch zwingend notwendig für den ökonomische Erfolg eines Projekts. Für diese Arbeit soll jedoch die Annahme gelten, dass es möglich sei die Anforderungen so vollständig zu definieren, dass ihre Erfüllung mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem erfolgreichen Projektabschluss führt.

Die in der Automobilbranche üblichen, erfahrungsbasierten Entwicklungsmethodiken sehen zu bestimmten Zeitpunkten, die vom geplanten SoP-Termin rückwärts gerechnet werden, jeweils die Erreichung gewisser Entwicklungsziele vor. Aus diesen Entwicklungszielen lassen sich zeitdiskrete Soll-Reifegrade für die jeweiligen Meilensteine ableiten. Durch Interpolation zwischen diesen Werten ergibt sich der theoretische, monoton steigende Verlauf des Soll-Reifegrades. Der zeitkontinuierliche Verlauf des realen Entwicklungsstands kann hingegen aufgrund von Änderungen in Produkt oder Produktionssystem, welche sich auf bereits abge-

sicherte Umfänge auswirken, auch wieder absinken (Reifegradverlust). Wenngleich der Entwicklungsstand als kontinuierliche Größe jederzeit existiert, wird er in der Praxis nur zu bestimmten Zeitpunkten durch Absicherungsmaßnahmen gemessen und damit als Ist-Reifegrad bekannt (diese Zeitpunkte sind in **Abbildung 27** mit $t1-t5$ gekennzeichnet). Die Absicherungsmaßnahmen dienen also neben der Identifikation und Behebung von Defiziten auch zur Prüfung des Projektfortschritts, indem der bestimmte Ist-Reifegrad dem Soll-Reifegrad gegenübergestellt wird (in **Abbildung 27** exemplarisch für $t2$ mit ΔR gekennzeichnet). [58, S. 84-88]

Liegt die ermittelte Ist-Reife unter der geplanten Soll-Reife, wurden die Ziele der Phase nicht erreicht und es ist ggf. erforderlich zusätzliche Ressourcen einzusetzen, um den Entwicklungszeitplan einhalten zu können. Andernfalls entspricht der Entwicklungsstand der Zielsetzung oder übertrifft diese sogar. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die auf diese Weise ermittelte Ist-Reife selbst bei valider Ermittlung lediglich eine Momentaufnahme darstellt und die Zielerreichung zu einem Meilenstein aufgrund der beschriebenen Schwankungen des realen Reifegrads nur bedingt als Indikation für den weiteren Projektverlauf gewertet werden sollte. In der Praxis ergeben sich bei der Messung des Ist-Reifegrades mit dem heute etablierten Vorgehen vielfältige Herausforderungen, welche die Validität der Ergebnisse stark beeinträchtigen können.

Eine explizite, vollumfängliche und domänenübergreifende Absicherung eines Entwicklungsstandes, wie sie in dem dargestellten Modell angenommen wird, findet in der Realität aufgrund des damit verbundenen Aufwands nicht statt. Hinsichtlich Vollständigkeit und Validität der Betrachtung kommt lediglich die Serienproduktion am Ende des Hochlaufs als ultimative Prüfung der Entwicklungsergebnisse dieser Annahme nahe. Und selbst hier umfasst die Evaluation nicht immer alle Aspekte. Denn, wie zahlreiche Rückrufaktionen in den vergangenen Jahren gezeigt haben, kann es auch vorkommen, dass Defizite erst Jahre nach dem SoP entdeckt werden.

Stattdessen erfolgt die Absicherung in der Praxis meist domänen- und themenspezifisch, es werden lediglich Teilumfänge und bestimmte Produktvarianten geprüft. Selbst diese eingeschränkten Prüfungen ziehen sich jedoch oftmals über viele Wochen. Da die Entwicklung in dieser Zeit keineswegs stillsteht, sind die Ergebnisse zum Zeitpunkt ihrer Verfügbarkeit bereits in Teilen veraltet, denn der evaluierte Entwicklungsstand entspricht nicht mehr dem aktuellen. Insbesondere bei der Absicherung mit Hardwareaufbauten stellt dies ein Problem dar, da diese aufgrund der Vorlaufzeit für Fertigung bzw. Beschaffung der Komponenten stets deutlich hinter dem aktuellen Entwicklungsstand zurückliegen. Erst gegen Ende der Serienentwicklung, wenn die Zahl der Produktänderungen abnimmt und zunehmend Serienteile verfügbar sind, konvergiert der Stand der Prototypen mit dem Entwicklungsstand.

Abgesehen von den praktischen Limitationen bezüglich des Absicherungsumfangs können auch menschliche und sozio-kulturelle Faktoren sowie die Unternehmenskultur einen Einfluss auf die Bewertung des Entwicklungsfortschritts haben. Da insbesondere im Bereich der Prozessabsicherung einige der etablierten Bewertungsmethoden eher subjektiver Natur sind und nicht strikt auf objektiven Messgrößen basieren, und die an der Absicherung beteiligten Personengruppen jeweils individuelle, teilweise gegensätzliche Interessen verfolgen ist eine

valide Beurteilung nicht immer sichergestellt. Bei der Betrachtung realer Entwicklungsprojekte kann gelegentlich beobachtet werden, dass vor gewissen Meilensteinen durch zusätzlichen Ressourceneinsatz versucht wird die Reife in kurzer Zeit soweit zu steigern, dass die geforderten Ziele erfüllt werden [58, S. 87]. Da die Prüfung wie bereits ausgeführt zu keinem Zeitpunkt ganzheitlich erfolgt, kann es durchaus vorkommen, dass sich die überproportionale Steigerung der Reife im zu evaluierenden Bereich negativ auf die Reife in anderen, zum jeweiligen Meilenstein nicht geprüften Bereichen auswirkt. Der Entwicklungsfortschritt erscheint dadurch positiver als er im Hinblick auf die Erreichung der übergeordneten Projektziele tatsächlich ist.

Bei der Produktion der Prototypen werden laufend implizit bestimmte Eigenschaften wie beispielsweise die geometrische Konsistenz geprüft, da Defizite unmittelbar auffallen und gemeldet werden. Zudem können die Werker angewiesen werden, bestimmte Aspekte explizit zu kontrollieren. Dieser Prozess wird in der vorliegenden Arbeit als kontinuierliche, produktionsbegleitende Absicherung bezeichnet. In der heute üblichen Ausprägung und mangels einer systematischen Vorgehensweise, welche eine Aussage zur Testabdeckung ermöglicht, eignet sich diese Absicherungsform jedoch nur sehr bedingt für die Prüfung des Projektfortschritts.

Zusammenfassend lassen sich Absicherungsmaßnahmen anhand der folgenden Kriterien charakterisieren:

- **Betrachtungsumfang:** Anteil der untersuchten Baugruppen, Produktvarianten oder Prozessen an der Gesamtzahl der zum Absicherungszeitpunkt definierten. Im Kontext dieser Arbeit als *horizontale Testabdeckung* bezeichnet.
Beispiele: Betrachtung der Verschraubung eines Head-up-Displays auf die Cockpit-Tragstruktur (Ein einzelner oder wenige zusammengehörende Prozesse, eine Baugruppe), Betrachtung der gesamten Montage einer Cockpit-Variante (viele Prozesse, mehrere Baugruppen, eine Variante) oder Absicherung aller aus Montagesicht relevanter Cockpit-Varianten (viele Prozesse, mehrere Baugruppen, mehrere Varianten)
- **Betrachtungstiefe:** Untersuchte Eigenschaften, Merkmale oder Aspekte von Produkt und / oder Prozess, in dieser Arbeit als *vertikale Testabdeckung* bezeichnet.
Beispiele: Gezielte Untersuchung einzelner Aspekte (z.B. Montagekräfte, haptisches Feedback bei Steckverbindungen), Betrachtung aus der Sicht einer Domäne / Disziplin (beispielsweise Arbeitsergonomie), gesamthafte Betrachtung (z.B. Abbildung aller montagerelevanter Aspekte eines Serienarbeitsplatzes und Bewertung hinsichtlich aller bekannter Anforderungen)
- **Anzahl der Wiederholungen:** Bei sehr fokussierten Bewertungen und Aspekten mit geringen Abhängigkeiten, wie beispielsweise der Untersuchung der Kollisionsfreiheit mittels 3D-Simulation, ist es für eine valide Aussage häufig ausreichend, den Test einmalig durchzuführen. Bei komplexeren Fragestellungen und unübersichtlichen Abhängigkeiten wie sie in einer realen Montagesituation anzutreffen sind, steigt mit der Anzahl der Wiederholungen hingegen die Wahrscheinlichkeit, dass auch statistisch unwahrscheinlichere Phänomene beobachtet werden. In diesen Fällen kann die Anzahl der Wiederholungen daher als Indikator für die Verlässlichkeit der Ergebnisse herangezogen werden.

- **Zeitliche Verortung:** Bei zeitdiskreten Absicherungsmethoden ist der Zeitpunkt der Durchführung im Entwicklungsprozess sorgfältig zu wählen. Er bestimmt maßgeblich den Entwicklungsstand und die Seriennähe der Bauteile sowie den Grad, zu dem die Produktionsabläufe definiert und ausgeplant sind. Bestimmte Aspekte können aufgrund ihrer Abhängigkeiten erst sinnvoll abgesichert werden, wenn gewisse Entwicklungsergebnisse vorliegen. Beispielsweise ist es kaum sinnvoll die physische Belastung (Ergonomie) oder die Materialbereitstellung zu betrachten, solange die Montage-reihenfolge und damit die Verteilung der Montagetätigkeiten auf die Arbeitsstationen nicht festgelegt ist. Isolierte Aspekte wie beispielsweise die Montagekräfte einer bestimmten Clip-Verbindung lassen sich hingegen deutlich früher bewerten. In späteren Phasen ist die Gefahr geringer, dass die Absicherungsergebnisse durch umfangreichere Konzeptänderungen obsolet werden und die Evaluierung erneut durchgeführt werden muss. Gleichzeitig sinken (insbesondere im Produkt) die Möglichkeiten, noch ökonomisch vertretbar Anpassungen vorzunehmen.
- **Umfeld:** Die Evaluierung kann entweder in einer Werkstatt- bzw. Laborumgebung oder in einem Serienmontageumfeld stattfinden. Bei ersterem ist die mögliche Betrachtungstiefe limitiert, da bestimmte Aspekte (z.B. dynamische Abläufe bei Förder-technik) nicht adäquat dargestellt und bewertet werden können. Findet die Absicherung hingegen auf einer Serienlinie statt, auf der parallel die Produktion eines anderen Modells läuft, besteht die Gefahr diese zu beeinträchtigen. Daher haben einige Unternehmen eigene Pilotwerke aufgebaut, die eine Nachbildung der Serienmontage und damit eine vergleichsweise valide Absicherung ermöglichen.

Die Bestimmung der Referenz (vollständige Abdeckung) stellt in der Praxis sowohl bei der horizontalen wie auch der vertikalen Testabdeckung eine Herausforderung dar. Zum einen ändern sich Produkt und Prozesse in der Entwicklung besonders in frühen Phasen laufend. Zum anderen ist nicht immer sofort ersichtlich welche Varianten tatsächlich abgesichert werden müssen. Zudem sind die abzusichernden Eigenschaften insbesondere bei Montageprozessen meist nicht vollständig bekannt und spezifiziert, die Absicherung erfolgt in der Praxis erfahrungsbasiert.

Methoden für die Montageprozessabsicherung sind weder standardisiert, noch ist ihre Benennung einheitlich bzw. durchgängig. Wie die Bezeichnungen sind auch die Vorgehensweisen im Detail unternehmens- und projektspezifisch, jedoch ähneln sich die grundlegenden Konzepte. Um die Bedeutung und möglichen Ausprägungen der angesprochenen Charakteristika aufzuzeigen, werden im Folgenden exemplarisch einige Methoden vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit in der industriellen Praxis beobachtet wurden. **Abbildung 28** zeigt eine Einordnung anhand der Testabdeckung. Die Farbe gibt dabei die Anzahl der Wiederholungen an, die bei der Methode üblicherweise durchlaufen werden: Je dunkler der Grauton, desto höher liegt in der Regel die Zahl der Wiederholungen.

Die Konzeptbestätigung dient dazu, einzelne neuartige Montageverfahren, Produktkonzepte oder Betriebsmittel im Detail zu evaluieren, um ihre Tauglichkeit sicherzustellen. Sie kommt überwiegend in den frühen Phasen zum Einsatz, kann aber auch später noch angewendet werden, wenn beispielsweise im Rahmen einer Modellpflege neue Ausstattungsoptionen oder

Varianten eingeführt werden sollen oder spät entdeckte Probleme behoben werden müssen. Die horizontale Testabdeckung ist hier sehr gering, es werden lediglich einzelne Prozesse und Komponenten geprüft, ggf. sind mehrere Varianten der betroffenen Baugruppe zu berücksichtigen. Die vertikale Testabdeckung kann je nach Zielsetzung, Phase (zeitlicher Verortung) und Umfeld gering (wenn nur einzelne Eigenschaften oder Aspekte geprüft werden) oder etwas umfangreicher (wenn die Prozesse ganzheitlich bewertet werden sollen) ausfallen. Während für einige Fragestellungen eine Bewertung im Laborumfeld ausreichend ist, ist insbesondere für die Evaluation von Montageverfahren und Betriebsmitteln häufig ein seriennahes Umfeld erforderlich.

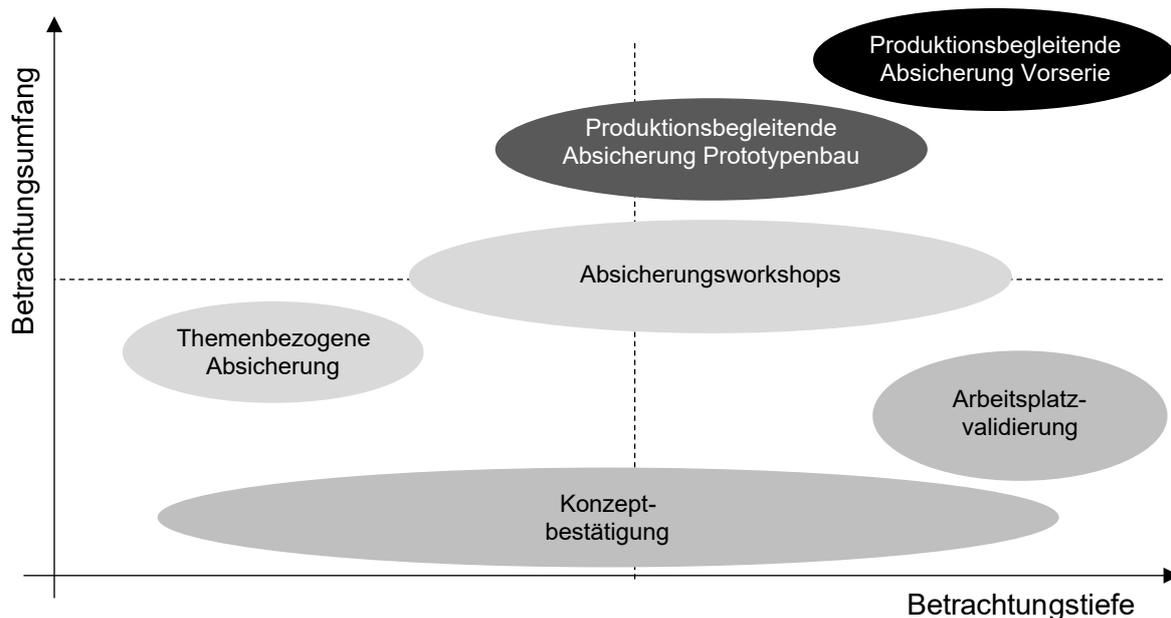


Abbildung 28: Klassifizierung von Absicherungsmaßnahmen anhand von Betrachtungsumfang (horizontale Testabdeckung) und -tiefe (vertikale Testabdeckung)

Im Rahmen der themenbezogenen Absicherung werden gezielt bestimmte Produktumfänge wie Schraubverbindungen, Steckverbindungen oder Kabelbäume kontrolliert. Im Fokus stehen dabei Eigenschaften und Prozesse, die erfahrungsgemäß Probleme bereiten und sich im Rahmen der virtuellen Absicherung nur unzureichend bewerten lassen. Zu derartigen Aspekten zählen beispielsweise die Codierung und das haptische Feedback elektrischer Steckverbindungen (Fehlhandlungssicherheit, Vermeidung von falsch gesteckten bzw. nicht vollständig eingerasteten Verbindungen) oder Kabelabzweige mit ungeeigneter Länge sowie falsch positionierte Halterungen (Verhalten flexibler Bauteile). Der Betrachtungsumfang (z.B. alle Steckverbindungen in einem bestimmten Bauraum) ist hier deutlich größer als bei der Konzeptbestätigung, die Betrachtungstiefe hingegen auf wenige Eigenschaften beschränkt. Da die bewerteten Aspekte aus dem Feld der produktionsbezogenen Produktabsicherung meist geringe Abhängigkeiten aufweisen, eignet sich diese Form der Absicherung bereits für frühere Projektphasen und stellt bezüglich der Seriennähe keine bzw. lediglich geringe Anforderungen an das Umfeld.

Im betrachteten Unternehmen erfolgt ein wesentlicher Teil der montagebezogenen Absicherung durch die Bewertung des gesamten Montageablaufs eines Fahrzeugs im Rahmen von interdisziplinären Absicherungsworkshops, welche je nach Neuheitsgrad des Produkts und der Prozesse mehrmals im Serienentwicklungsprozess mit jeweils phasenspezifischem Fokus durchgeführt werden. Dabei wird das Fahrzeug, begleitet durch Vertreter der Entwicklung, Planung und Produktion sowie ggf. Fachexperten (z.B. Spezialisten für Arbeitsschutz und Ergonomie), über mehrere Wochen hinweg im virtuellen oder physischen Raum Schritt für Schritt montiert und jeder Arbeitsschritt bewertet. Diese Form der Absicherung wird in der Literatur, insbesondere in industrienahen Publikationen und in Kombination mit virtuellen bzw. hybriden Methoden am häufigsten thematisiert, beispielsweise in [67] oder [72]. Die horizontale Testabdeckung ist hier deutlich höher als bei den bisher diskutierten Methoden, da ein gesamtes Fahrzeug betrachtet wird, allerdings üblicherweise nur in einer Ausstattungsvariante. Da es für eine Absicherung in diesem Umfang nicht mit vertretbarem Aufwand möglich ist alle Arbeitsstationen in einem serienähnlichen Umfeld abzubilden, finden die Events meist in einer Laborumgebung statt. Dies wiederum limitiert die vertikale Testabdeckung, welche angefangen mit einer eher rudimentären Bewertung zunimmt, je später im Entwicklungsprozess ein solches Event stattfindet.

Zu einem fortgeschrittenen Zeitpunkt der Serienentwicklung, wenn die Montageplanung schon weitgehend abgeschlossen ist, kann die Arbeitsplatzvalidierung angewendet werden, um die Abläufe im Detail zu optimieren und kritische Prozesse unter möglichst seriennahen Bedingungen zu prüfen. Dabei werden einzelne Arbeitsstationen, welche im Rahmen der vorgelagerten Absicherungstätigkeiten ausgewählt wurden, im Pilotwerk hinsichtlich der Materialbereitstellung, der Position des Montageobjekts bzw. der Karosserie, den Betriebsmitteln, der Fördertechnik und der Taktlänge detailgetreu abgebildet. So kann beispielsweise geprüft werden, ob die auf Basis geschätzter Ausführungszeiten geplanten Arbeitsinhalte tatsächlich zuverlässig innerhalb der Taktzeit ausführbar sind oder ob sich komplexe Montageaufgaben wie eine Zweimannmontage unter Zeitdruck bewältigen lassen. Durch Anpassung der Bereitstellung oder eine Änderung der Arbeitsfolge innerhalb des Takts kann versucht werden nicht unmittelbar wertschöpfende Tätigkeiten und Wege zu reduzieren. Ergonomische Aspekte und Eigenschaften mit starken Abhängigkeiten wie die Körperhaltung lassen sich in diesem Umfeld vergleichsweise aussagekräftig bewerten. Auf Basis der Beobachtungen können die Arbeitsanweisungen detailliert und Schulungsmaterialien für die Serienmitarbeiter erstellt werden. Aufgrund der Seriennähe ist die mögliche vertikale Testabdeckung sehr hoch, da nahezu alle wesentlichen Aspekte und Eigenschaften der Montageabläufe betrachtet werden können. Vollständig ist sie jedoch auch bei dieser aufwändigen Methode nicht, da sich beispielsweise Effekte, die durch den Modellmix auf einer MMAL entstehen, wie die Anstellung von Komponenten für verschiedene Modelle (Verwechslungsgefahr) oder Auslastungsschwankungen kaum simulieren lassen. Die horizontale Testabdeckung ist hingegen eher gering, da aufgrund des Aufwands nur ein Teil der Montageumfänge auf diese Weise bewertet werden kann. Um die Validität sicherzustellen und (in begrenztem Maß) auch Trainingseffekte zu berücksichtigen, werden die Versuche meist mehrmals mit denselben Komponenten oder montagerelevanten Varianten wiederholt.

Während es sich bei den bislang vorgestellten Methoden um Aktivitäten handelt, deren primäres Ziel in der Absicherung von Produktionsprozessen liegt, handelt es sich bei der produktionsbegleitenden Prozessabsicherung eher um eine Nebentätigkeit. Der Hauptgrund für den Bau von Prototypen liegt in dem Bedarf an Versuchsträgern zur Absicherung funktionaler Produkteigenschaften im Rahmen der Entwicklung und Zulassung, die Vorserie dient zusätzlich der Befähigung der Anlagen- und Steuerungstechnik sowie dem Training der Serienmitarbeiter. Die Absicherungstätigkeit folgt in diesem Kontext keiner systematischen Vorgehensweise zur Prüfung bestimmter Eigenschaften. Je nach Erfahrung der beteiligten Mitarbeiter beschränkt sie sich auf das Dokumentieren und Melden mehr oder weniger offensichtlicher oder zufällig entdeckter Defizite. Da während der Prototypenphase je nach Neuheitsgrad des Projekts einige Dutzend bis mehrere hundert Gesamtfahrzeuge unterschiedlicher Ausstattung gebaut werden, ist die horizontale Testabdeckung hoch. Aufgrund der werkstattähnlichen Umgebung lassen sich jedoch nicht alle Eigenschaften der Serienmontage adäquat darstellen und bewerten. Da zu Beginn der Prototypenproduktion die Prozessplanung noch andauert, folgt die Montage der Prototypen auch nicht im Detail den späteren Serienabläufen. Stattdessen orientieren sich die Werker primär an ihren Erfahrungen aus anderen Projekten und der Produktstruktur.

Die aussagekräftigsten Ergebnisse liefert die produktionsbegleitende Absicherung während der Vorserie. Während dieser Phase werden hunderte Fahrzeuge verschiedener Varianten aus Serienteilen im Serienumfeld durch Serienpersonal aufgebaut. Sowohl horizontale wie auch vertikale Testabdeckung sind hier maximal. Aufgrund der großen Anzahl der Wiederholungen ist die Wahrscheinlichkeit auch selten auftretende Probleme, wie ungünstige Passungskombinationen oder Variantenfolgen anzutreffen bei dieser Form der Absicherung am höchsten. Der wesentliche Nachteil liegt darin, dass Änderungen in dieser Phase nur noch sehr schwierig und mit entsprechenden Kosten umsetzbar sind. Eine drastische Kostensteigerung und Verzögerungen bis hin zu einer Verschiebung des SoP können die Folge sein. Schwierigkeiten bei der Vorserienproduktion können auf einer MMAL zudem die laufende Produktion anderer Modelle beeinträchtigen und dadurch weitere Verluste verursachen. Für die Serienentwicklung spielt diese Form der Absicherung daher eine untergeordnete Rolle, sie dient primär zur finalen Bestätigung der Produktionsabläufe.

Wie Eingangs angemerkt, handelt es sich bei den beschriebenen Methoden lediglich um Beispiele. Natürlich sind je nach Unternehmensstrategie und Ressourcen auch weitere Formen und andere Ausprägung möglich.

Die Ausführungen in diesem Abschnitt beantworten die erste Forschungsfrage nach den Gestaltungsmöglichkeiten bei der Montageprozessabsicherung bereits teilweise. Aufgrund der aufgezeigten Eigenschaften und Rahmenbedingungen der Absicherungsmaßnahmen wird davon ausgegangen, dass die produktionsbegleitende Prozessabsicherung das größte Potenzial für Optimierungen bietet. Entsprechend konzentriert sich die Methodenentwicklung im Rahmen dieser Arbeit auf diesen Anwendungsbereich. Für die Konzeption ist zunächst jedoch insbesondere im Hinblick auf die abzusichernden Eigenschaften und Aspekte eine tiefere Betrachtung erforderlich, welche im folgenden Abschnitt erfolgt.

4.2 Abzusichernde Aspekte und Eigenschaften

In Kapitel 2.2.4 wurden die vier Begriffe produktionsbezogene Produktabsicherung (Absicherung von Produkteigenschaften aus Sicht der Produktion, montagegerechte Produktgestaltung), produktbezogene Prozessabsicherung (wertschöpfende Montageprozesse, konstruktiv bedingter Arbeitsinhalt), produktionsbezogene Prozessabsicherung (Detaillierte Bewertung aller Produktionsprozesse) und Ressourcenabsicherung (z.B. Werkzeuge und Betriebsmittel) eingeführt.

Nun soll noch einmal genauer betrachtet werden, welche Eigenschaften und Aspekte aus diesen Kategorien für eine optimale Vorbereitung der Serienmontage bei der Absicherung berücksichtigt werden müssen. Dabei werden jeweils auch die Einflussfaktoren und Abhängigkeiten analysiert, da diese als Indikation für den optimalen Absicherungszeitpunkt herangezogen werden können.

4.2.1 Sammlung und Kategorisierung

Das Ziel der folgenden Betrachtung besteht in der möglichst vollständigen Sammlung abzusichernder Eigenschaften und der Priorisierung bzw. zeitlichen Verortung dieser anhand ihrer Abhängigkeiten. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine Absicherung so früh wie möglich (späte Änderungen vermeiden) und so spät wie nötig (Voraussetzungen für eine valide Bewertung müssen erfüllt sein) erfolgen sollte. Auch ist es zweckmäßig, Eigenschaften, die sich stark auf andere Aspekte auswirken frühzeitig zu betrachten. Für eine initiale Bewertung müssen nicht zwingend alle Voraussetzungen vollständig erfüllt sein. Die Absicherung einer Eigenschaft stellt oftmals mehr einen iterativen Prozess als ein singuläres, abgeschlossenes Ereignis dar.

Wack et al. analysieren in ihrer Arbeit zur digitalen und physischen Montageabsicherung anlaufrelevante Eigenschaften und unterteilen diese nach den Gewerken Montage, Logistik und der Fabrik [57]. Die aus ihrer Sicht relevanten Kriterien sind in **Tabelle 11** aufgelistet.

Wenngleich diese Aspekte für die grundlegende Funktion der Montage relevant sind, fehlen in ihrer Betrachtung wesentliche Themenbereiche. *Hesse und Weber* [14] nennen im Kontext der Herstellbarkeitsabsicherung zusätzlich die Konsistenz der Produktkonstruktion (geometrische Stimmigkeit und Verbindungskonzepte), die Fehlhandlungssicherheit (z.B. Verwechslung, falsche Positionierung, fehlerhafte Verbindung) sowie Aspekte der Qualität (sie sprechen vom Erscheinungsbild und der Anmutung).

Themen wie die Optimierung der Montageabläufe hinsichtlich der Effizienz oder die Vollständigkeit und Korrektheit der Arbeitsanweisungen werden jedoch auch in ihrer Betrachtung nicht berücksichtigt. Die untersuchte Literatur bleibt hinsichtlich konkret zu evaluierender Aspekte vage. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit auf Basis zahlreicher Expertengespräche und Beobachtungen der industriellen Praxis weitere, für die Montageprozessabsicherung relevante Kriterien zusammengetragen.

| Gewerk | Kriterium | Beispiel |
|----------|--|--|
| Montage | Zugänglichkeit von Ressourcen | Zugänglichkeit von Verbindungselementen durch entsprechende Werkzeuge ist sichergestellt |
| | Schrauber & Schraubeneigenschaften (z.B. Drehmoment) | Korrekte Werkzeuge sind im Montagebereich bereitgestellt (gilt insbesondere bei Sicherheitsrelevanz) |
| | Sonderwerkzeuge | Zusätzlich zu Standardressourcen benötigte Werkzeuge |
| | Optimierung Werkzeugauswahl | Bereitstellung von Standardressourcen und Reduktion von Sonderwerkzeugen |
| | Ergonomie von Montagevorgängen | Bewertung von Zugänglichkeit, Körperhaltung und Belastung, Ermittlung der Bearbeitungszeiten |
| | Montagereihenfolge | Überprüfung und Optimierung der festgelegten Montagereihenfolge |
| Logistik | Materialbereitstellung | Vermeidung langer Wege für den Werker |
| | Ladungsträger | Optimalen Ladungsträgerinhalt ermittelt |
| | Logistikkonzept | Bereitstellung am Band sichergestellt |
| Fabrik | Wege | Wege für Montage und Belieferung geprüft und optimiert |
| | Flächenbedarf | Flächen für Bandabschnitte und Materialbereitstellung sowie Lagerorte sind ausreichend |

Tabelle 11: Für den Produktionsanlauf abzusichernde Kriterien nach Wack et al. [57, S. 49]

Diese werden im Rahmen einer theoretischen Betrachtung zunächst in die vier oben genannten Kategorien unterteilt und vorgestellt. Die Nummerierung stellt dabei keine Priorisierung dar, sie soll lediglich die Referenzierung im folgenden Text erleichtern. Anschließend wird für eine praxisnähere Sichtweise die Perspektive eines Werkers in der Montagesituation eingenommen, um die an den verschiedenen Stellen im Montageablauf jeweils relevanten Eigenschaften zu diskutieren.

Produktionsbezogene Produktabsicherung

- 1) **Geometrische Konsistenz der Konstruktion, Verbindungskonzepte:**
Die Konstruktion ist kollisionsfrei in Konstruktionslage, Verbindungskonzepte und -elementen erfüllen die beabsichtigte Funktion.
- 2) **Geometrische Baubarkeit:**
Es existiert mindestens ein kollisionsfreier Ein- und Ausbaupfad, daher ist es möglich eine realisierbare Montagereihenfolge zu finden.
- 3) **Toleranzeinflüsse:**
Schwankungen innerhalb der zulässigen Toleranzen führen selbst bei ungünstigen Paarungen nicht zu Defiziten bei der Baubarkeit oder Qualitätsproblemen.

- 4) **Montagegerechte Produktgestaltung:**
Einhaltung allgemeiner Konstruktionsvorgaben, die dazu dienen sollen montage-technisch ungünstige Lösungen zu vermeiden und die Montagekosten zu reduzieren (z.B. Reduzierung der Einzelteile, Varianten und konstruktiv bedingter Arbeitsinhalte, Vermeidung großer oder unhandlicher Bauteile sowie empfindlicher Materialien bzw. Oberflächen, Positionierung wartungsrelevanter oder reparaturanfälliger Komponenten an leicht zugänglichen Orten, konstruktive Fehlhandlungssicherheit).

Produktbezogene Prozessabsicherung

- 5) **Baubarkeit im Produktionssystem:**
Auch unter Berücksichtigung der strukturellen und prozessualen Restriktionen (z.B. bestehende Werkstrukturen, einzuhaltende Trocknungszeiten bei Klebeverbindungen) existiert eine kollisionsfreie Fügereihenfolge, die definierte Montagereihenfolge stellt eine solche Folge dar.
- 6) **Zugänglichkeit der Montagestellen:**
In der vorgegebenen Montagereihenfolge sind Montageräume und Verbindungselemente mit Händen bzw. Werkzeugen erreichbar und bieten ausreichend Freiraum für die korrekte Positionierung oder das Herstellen der Verbindung.
- 7) **Prozessparameter Verbindungstechnik:**
Alle für die Montage erforderlichen, produktbezogenen Parameter der Verbindungstechnik (beispielsweise das Anzugsdrehmoment oder die Drehzahl bei Schraubverbindungen) sind inklusive zulässiger Toleranzen definiert.
- 8) **Wertschöpfende Montageprozesse:**
Alle konstruktiv bedingten Arbeitsinhalte sind definiert und ihre Ausführungszeiten bestimmt (eHPV), zu nutzende Betriebsmittel, Hilfsstoffe und Prozessparameter festgelegt. Entsprechende Arbeitsanweisungen, die eine Prozessbeschreibung sowie alle benötigten Informationen zu Komponenten, Fügfolgen, Prozessparametern sowie Betriebs- und Hilfsmitteln umfassen sind erstellt.

Produktionsbezogene Prozessabsicherung

- 9) **Sekundäre Montagefunktionen und Unterstützungsprozesse:**
Alle der Montage zuzurechnenden Tätigkeiten, die über die konstruktiv bedingten Arbeitsinhalte hinaus für die Produktion erforderlich sind, sind definiert, beschrieben und ihre Ausführungszeiten bestimmt. Dies stellt die Voraussetzung für die Ermittlung der Planzeiten und die Verteilung der Arbeitsinhalte auf die Montagearbeitsplätze (Abtaktung) dar.
- 10) **Abtaktung:**
Alle erforderlichen Tätigkeiten sind unter Einhaltung der Montagevorrangbeziehungen bzw. der Montagereihenfolge, struktureller Restriktion sowie der Taktzeit auf die

verfügbaren Arbeitsstationen verteilt. Für die Arbeitsinhalte innerhalb eines Takts ist eine Sequenz vorgegeben.¹

11) **Effizienz und Taktstabilität:**

Die Abfolge der Montagetätigkeiten und die Abtaktung sind unter den gegebenen Bedingungen ideal, durch eine Umtaktung lassen sich Zusatztätigkeiten (z.B. Wege, Positionswechsel) nicht weiter reduzieren. Die Auslastung ist optimal und Schwankungen minimiert. Die Behebung kleiner Montagefehler ist im Takt oder innerhalb des Montageabschnitts möglich (Inline-Nacharbeit).

12) **Fehlhandlungssicherheit und Montagequalität:**

Die folgenden Aspekte der Fehlhandlungssicherheit und Montagequalität lassen sich sowohl konstruktiv (vgl. montagegerechte Produktgestaltung) wie auch prozessual (ggf. mit Zusatzaufwand oder zusätzlichen Betriebsmitteln) lösen:

- Es besteht keine Verwechslungsgefahr (ähnliche Bauteile / Varianten)
- Eine falsche Positionierung, Ausrichtung (Spaltmaße, Verzug, Spannungen, Erscheinungsbild), oder Verbindung (Reihenfolge) ist ausgeschlossen
- Das Vergessen von Montagetätigkeiten ist ausgeschlossen
- Der Werker ist in der Lage seine Arbeit selbst zu kontrollieren (Werkerselbstkontrolle) und ggf. Fehler zu korrigieren oder zu melden
- Die Montage- bzw. Verbindungsstelle ist für den Werker im Prozess einsehbar (nicht zwingend erforderlich, jedoch für die Werkerselbstkontrolle und die Fehlervermeidung günstig)
- Es besteht keine Beschädigungsgefahr (Produkt oder Betriebsmittel). Ggf. sind mitigierende Maßnahmen (Produktschutz, Schutzmaßnahmen an Werkzeugen / Betriebsmittel, organisatorische Maßnahmen wie Arbeitsanweisungen oder Arbeitskleidung) definiert

Des Weiteren sind folgende Aspekte aus prozessualer Sicht zu betrachten:

- Die Einhaltung der definierten Montageabläufe ist sichergestellt und dadurch die Wiederholgenauigkeit gegeben
- Für (Sicherheits-) kritische Umfänge sind technische Absicherungsmaßnahmen (z.B. digitale Schraubsysteme, Kamerainspektion) oder manuelle Prüfungen (4-Augen-Prinzip, Qualitätskontrolle) vorgesehen
- Der Umgang mit Ausschuss (defekten bzw. aussortierten Teilen) ist so geregelt, dass ein erneuter Verbau ausgeschlossen ist

¹ Anmerkung: Zwischen der Abtaktung, den Montagetätigkeiten und der Struktur bestehen starke wechselseitige Abhängigkeiten. Werden Arbeitsinhalte zwischen den Arbeitsplätzen verschoben (umgetaktet), so können sich bei den Zusatztätigkeiten und der Materialbereitstellung Veränderungen ergeben, welche im ungünstigsten Fall aufgrund einer Takzeitüberschreitung wiederum weitere Umtaktungen erfordern.

13) Ergonomie und Arbeitssicherheit

Es ist sichergestellt, dass der Werker die Tätigkeit ohne physische und kognitive Überlastung durchführen kann und auch langfristig keine gesundheitliche Beeinträchtigung erfährt. Im Rahmen der Bewertung sind (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) folgende Aspekte zu prüfen:

- Es besteht keine akute Verletzungsgefahr oder ein gesundheitliches Risiko (z.B. scharfe Kanten, Splitter- oder Funkenflug, Lasten, Chemikalien).
- Sofern sich gewisse Risiken nicht ausschließen lassen: Geeignete persönliche Schutzausrüstung (PSA) ist geplant und bereitgestellt. Die Werker sind im Umgang geschult, die korrekte Anwendung wird regelmäßig geprüft.
- Es sind keine unzulässig hohen Montagekräfte erforderlich oder unzulässig schwere Lasten zu heben.
- Monotone bzw. repetitive Tätigkeiten in ungünstiger Körperhaltung werden vermieden. Ggf. sind organisatorische oder technische Gegenmaßnahmen (z.B. Job-Rotation, Hilfsmittel, Handhabungsgeräte) vorzusehen.
- Auch bei ungünstiger Derivate- oder Variantenfolge darf keine zeitliche Überlastung (Stress) auftreten.
- Weitere Stressfaktoren wie Licht, Lärm, Temperatur / Hitze, etc. sind zu optimieren
- Eine kognitive Überlastung (z.B. bei hoher Varianz in einem Takt) wird durch geeignete Informationsbereitstellung vermieden.

Ressourcenabsicherung**14) Prozessbeschreibung - Arbeitsanweisungen und Prozessparameter**

Alle Montageprozesse sind vollständig & korrekt beschrieben, alle erforderlichen Prozessparameter und Werkzeuge / Betriebsmittel definiert und entsprechende Arbeitsanweisungen liegen analog oder digital vor. Sofern erforderlich, ist eine Notstrategie (z.B. beim Ausfall einzelner Betriebsmittel) festgelegt.

15) Struktur, Arbeitsplatzlayout

Es steht an der vorgesehenen Stelle im Montageablauf (Materialfluss) ausreichend Raum für den geplanten Montagearbeitsplatz zur Verfügung, Bewegungsfreiraum für eine behinderungsfreie Montage (insb. bei der Handhabung großer Bauteile) ist gegeben. Sofern vorhanden, ist die Fördertechnik entsprechend eingerichtet.

16) Materialbereitstellung und Logistik

Erforderliche Komponenten sind in ausreichender Menge bereitgestellt (die Planung von Bereitstellorten, Behältern und der Verpackung bzw. Entsorgung zählt in der Regel zur Logistik- und nicht zur Montageplanung) und es besteht ein adäquates Versorgungskonzept. Varianten und Teileversion sind korrekt und eindeutig gekennzeichnet / identifizierbar. Sofern eine Erfassung der Bauteile für die Verbauabsicherung oder Dokumentation gefordert ist, sind entsprechende Prozesse definiert und stehen geeignete Betriebsmittel zur Verfügung (z.B. Handscanner).

17) **Automatisierungstechnik und Anlagen**

Erforderliche Anlagen sind vorhanden, eingerichtet, funktionsfähig und erfüllen ihren Zweck. Verfügbarkeit und korrekte Funktion sind durch entsprechende Instandhaltungs- und Wartungs- sowie Reparaturprozesse sichergestellt.

18) **Werkzeuge und Sonderbetriebsmittel (SBM)**

Erforderliche Handwerkzeuge, Sonderbetriebsmittel (wie Handhabungsgeräte, Lehren, Fädelhilfen, Schutzabdeckungen und ähnliche Montagehilfsmittel) und Hilfsstoffe (z.B. Schmierstoffe oder Reinigungsmittel) sind vorhanden und falls erforderlich eingerichtet (z.B. digitale Schraubtechnik). Verfügbarkeit und korrekte Funktion sind durch entsprechende Instandhaltungs- und Wartungs- und Reparaturprozesse sichergestellt. Messmittel sind kalibriert und werden regelmäßig geprüft.

19) **Informationsbereitstellung und Informationssysteme**

Dem Werker liegen alle für die Montage erforderlichen Informationen vor. Sofern über das Offline-Training / die Basis-Qualifikation und die allgemeinen Arbeitsanweisungen hinausgehende Informationen erforderlich sind, müssen diese im Prozess bereitgestellt werden (z.B. Analog auf Papier, über Kennzeichnungen am Werkstück oder mittels digitaler Variantenanzeige). Sofern die Tätigkeit an einem Arbeitsplatz die Interaktion mit einem IT-System erfordert (z.B. zur Dokumentation, Meldung von Mängeln, Quittierung oder Durchführung von Prüfschritten) muss ein entsprechendes System mit adäquaten Bedienelementen vorhanden sein.

20) **Personal und Qualifikation**

Es ist ausreichend Personal vorhanden um die geplanten Montagearbeitsplätze im geplanten Schichtmodell zu besetzen. Das Personal ist hinsichtlich der allgemeinen Arbeitsanweisungen und der arbeitsplatzspezifischen Montageaufgaben geschult. Im Rahmen der zentralen Montageplanung wird der Personalbedarf im Allgemeinen nur indirekt über die HPV berücksichtigt, die konkrete Planung und ggf. Qualifikation obliegt meist der Arbeitsvorbereitung bzw. dem Serienwerk.

Viele der genannten Punkte, insbesondere im Bereich der produktionsbezogenen Prozessabsicherung und der Ressourcenabsicherung könnten beliebig vertieft werden, beispielsweise stellen die Arbeitssicherheit oder die Instandhaltung der Betriebsmittel selbst jeweils sehr umfangreiche Themen- und Forschungsgebiete dar. Eine detailliertere Diskussion würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit übersteigen und ist auch für den betrachteten Themenbereich der Montageplanung und -absicherung nicht notwendig.

4.2.2 Betrachtung im Montageablauf

Nach dieser Diskussion absicherungsrelevanter Aspekte und Eigenschaften soll nun die Sichtweise eines Montagemitarbeiters eingenommen werden, um aufzuzeigen, welche Faktoren in welcher Montagesituation relevant sind. Daraus soll anschließend auch abgeleitet werden, welche Faktoren sich für eine Absicherung in der Prototypenmontage besonders eignen und welche Limitierungen zu erwarten sind. Vereinfachend wird zunächst von einem rein manuellen Montageprozess an einem einfachen Arbeitsplatz der Automobilmontage ohne Anlagen

oder Automatisierungstechnik ausgegangen. Aufgrund der geringen Abhängigkeit von einem Serenumfeld kann das Modell im Wesentlichen sowohl für die Unikat- und Kleinserien-, Prototypen- und Vorserien- wie auch die Serienproduktion genutzt werden.

Ausgangssituation

Der qualifizierte Werker (Anforderung 20) befindet sich in seinem adäquat dimensionierten Arbeitsbereich (Anforderung 15). Handelt es sich um den ersten Arbeitsschritt einer Vormontage, so hat er einen leeren Werkstückträger (z.B. Front- und Heckmodule, Cockpit) oder ein Karosserieteil (Türen, Klappen) in einer entsprechenden Aufnahme vor sich. An der Hauptmontagelinie analog dazu die lackierte Karosserie, welche durch die Fördertechnik in einer bestimmten Höhe und Ausrichtung getragen wird. Handelt es sich um einen später im Montageablauf angesiedelten Arbeitsplatz, so weist das Modul bzw. das Fahrzeug einen gewissen Montagezustand auf, welcher sich aus den bereits erledigten Schritten ableiten lässt.

Typischerweise ist die Automobilmontage stark arbeitsteilig ausgeprägt, entsprechend beläuft sich der Arbeitsinhalt einer einzelnen Station auf wenige Arbeitsschritte² und eine Taktzeit von unter einer Minute bis zu wenigen Minuten. Ein großer Teil der Arbeitsschritte lässt sich grob in die Phasen Aufnehmen, Ausrichten / Positionieren / Manipulieren und Verbinden unterteilen. Wird in einem Arbeitsschritt lediglich eine Aktion an dem Montageobjekt ausgeführt ohne zusätzliche Komponenten einzubringen, entfällt das Aufnehmen. Ebenso entfällt das Verbinden falls der Arbeitsschritt keine Verbindungselemente umfasst, oder die Verbindung in einem nachgelagerten Schritt erfolgt. Folglich kann ein Arbeitsschritt auch lediglich aus dem Herstellen einer Verbindung bestehen. **Abbildung 29** stellt dieses Modell eines Montageschritts dar.

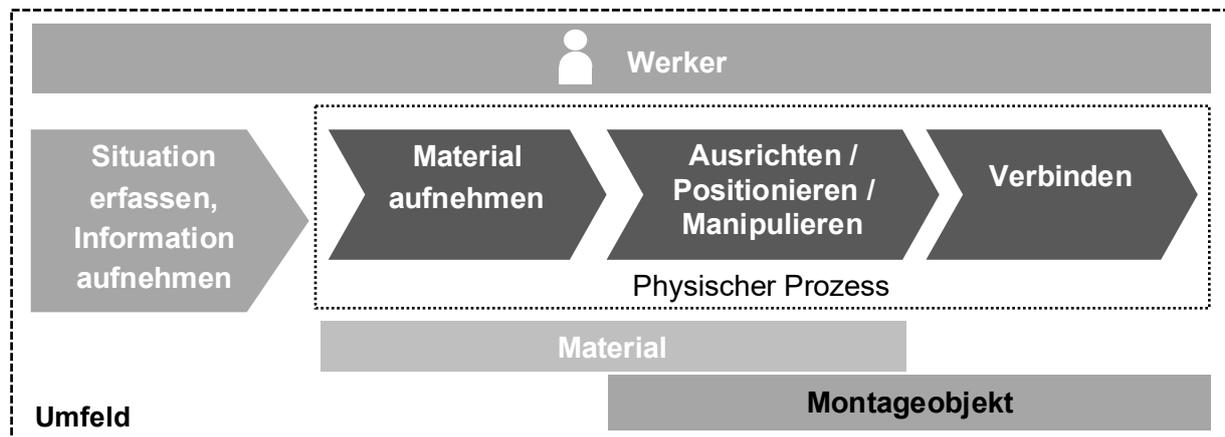


Abbildung 29: Modell eines Arbeitsschritts in der manuellen Montage.

² Anmerkung: Die Wahl eines sinnvollen Umfangs stellt eine Herausforderung bei der Definition der Arbeitsschritte dar. Kleine Arbeitsschritte erhöhen die Flexibilität bei der Abtaktung und ermöglichen eine Maximierung der Auslastung, gleichzeitig steigt die Komplexität in der Planung. Zusammengehörige Umfänge sollten zudem an einem Arbeitsplatz erfolgen, andernfalls müssen dieselben Komponenten und Werkzeuge an mehreren Stationen bereitgestellt werden.

Informationsaufnahme

Vor Beginn des physischen Prozesses muss der Werker die Montagesituation erfassen. Es muss ihm bekannt sein, welcher Arbeitsschritt ausgeführt werden soll und welche Tätigkeiten er umfasst. Aufgrund der potenziellen Abhängigkeit von der Produktvariante ist diese dabei zuerst festzustellen.

Dabei müssen die Anforderungen *14. Prozessbeschreibung, Arbeitsanweisungen und Prozessparameter* und *19. Informationsbereitstellung, Informationssysteme* sowie implizit *8. Definition wertschöpfender Montageprozesse* und *9. Definition sekundärer Montagefunktionen und Unterstützungsprozesse* erfüllt sein. Zusammengefasst müssen die Informationen zum Montageprozess vollständig und korrekt vorliegen und dem Werker zugänglich sein. Eine kognitive Überlastung muss dabei ausgeschlossen werden (vgl. Anforderung 13).

Sofern es sich um eine Station ohne Varianz handelt, an der stets dieselbe Montageaufgabe erledigt wird, ist keine weitere Klärung nötig. Handelt es sich hingegen um einen Arbeitsplatz mit mehreren möglichen Modellen oder Varianten, die sich aus Montagesicht unterscheiden, so muss zunächst identifiziert werden, um welche Variante es sich bei dem vorliegenden Produkt handelt. Diese Varianteninformation kann implizit gegeben sein, beispielsweise bei einer geringen Anzahl an Möglichkeiten und offensichtlichen Unterscheidungsmerkmalen (z.B. Links- oder Rechtslenker, Limousine oder Cabrio) oder entsprechender Kennzeichnung. Ist die Variante hingegen nicht zweifelsfrei erkennbar, so muss diese Information aus einer entsprechenden Dokumentation (z.B. Produktionsauftrag) entnommen oder durch ein Informationssystem bereitgestellt werden.

Nachdem die Frage der Produktvariante geklärt ist, kann der eigentliche Arbeitsinhalt betrachtet werden. Bei geringer Varianz und Komplexität der Montageaufgabe sollte ein, für den Arbeitsgang entsprechend qualifizierter Mitarbeiter in der Lage sein, die Montageaufgabe ohne zusätzliche Information zu erfüllen. Bei höherer Komplexität der Montageaufgabe oder größerer Variantenzahl ist hingegen, ebenso wie bei weniger erfahrenem bzw. geübtem Personal mehr oder weniger zusätzliche Information erforderlich. Diese kann beispielsweise in Form von grafischen Darstellungen, textuellen Beschreibungen, einzelnen Parametern (z.B. Anzahl der Verbindungselemente, Drehmomente) oder auch ausführlicheren Prozessbeschreibungen geliefert werden.

Aufgrund der Neuartigkeit von Produkt und Prozessen, den laufend einfließenden Änderungen und der Vielzahl an Sonderfällen ist im Prototypenbau von ungeübtem (wenngleich meist erfahrenem) Personal und einem entsprechend höheren Informationsbedarf auszugehen. Dies verstärkt sich dadurch, dass die Prototypenmontage meist deutlich weniger arbeitsteilig aufgebaut ist als eine Serienmontage und ein Werker dort entsprechend deutlich mehr Arbeitsumfänge ausführen muss als in der Serie.

Aufnehmen

In der ersten Phase des physischen Ablaufs, dem Aufnehmen, werden die für den Arbeitsschritt benötigten Bauteile identifiziert, ggf. entpackt und aufgenommen.³ Dies erfordert, neben der bereits genannten Information bzgl. der benötigten Bauteile, die Erfüllung der Anforderung *16. Materialbereitstellung und Logistik* (Das benötigte Material ist vorhanden, korrekt gekennzeichnet und ggf. mit Schutzmaßnahmen versehen), sowie teilweise der unter *11. Effizienz und Taktstabilität* sowie *15. Struktur und Arbeitsplatzlayout* genannten Aspekte (z.B. hinsichtlich der Wege und Freiräume) und ggf. *18. Werkzeuge und SBM* (bei der Verwendung von Handhabungsgeräten für die Bewegung schwerer bzw. großer Komponenten). Zudem sind die Aspekte der Ergonomie und Arbeitssicherheit (13.) und Fehlhandlungssicherheit (11.) zu berücksichtigen.

Die Art der Bereitstellung kann sich je nach Typ und Eigenschaften des Bauteils wie auch zwischen Serie und Prototypenbau stark unterscheiden. Kleinere, sortenreine Komponenten wie Schrauben, Clips oder ähnliche Standardkomponenten bzw. Kleinteile ohne Varianz werden meist in Regalen mit Schüttgutbehältern vorgehalten. Zur Reduzierung der Wege ist es bei Arbeitsplätzen mit größerer räumlicher Ausdehnung und Montageaufgaben, welche eine größere Zahl solcher Teile erfordert zweckmäßig, dass die Werker am Körper Taschen oder ähnliche Behälter tragen, die sie bei Bedarf aus den Schüttgutbehältern befüllen. Dabei ist besonders darauf zu achten, dass eine Verwechslung der Komponenten ausgeschlossen wird (z.B. indem bei Schrauben ähnlicher Gestalt unterschiedliche Schraubenköpfe verwendet werden). Größere Bauteile werden bei geringer Varianz meist sortenrein in entsprechenden Ladungsträgern oder Regalen angestellt. Bei höherer Varianz, limitierter Taktzeit und begrenzter Anstellfläche ist es oft zweckmäßig den Werkern einen fahrzeugspezifisch vorkommissionierten Teilesatz zu liefern.

Je nach Kritikalität der Komponenten (sicherheitskritische Bauteile wie Airbags) und Varianz kann es gefordert sein, die aufgenommenen Komponenten für die Prüfung gegen den Fahrzeugauftrag bzw. die Dokumentation in der Fahrzeugakte zu erfassen. Dabei kann entweder nur die Materialnummer geprüft (richtiger Materialtyp) oder auch eine eindeutige Seriennummer erfasst werden. Bei elektronischen Elementen besteht zunehmend die Notwendigkeit auch die Softwareversion zu prüfen, da sich nicht alle dieser Module nachträglich im verbauten Zustand mit anderer Software ausstatten („Flashen“) lassen. Da eine handschriftliche Erfassung außerhalb der Unikat- und Kleinserienproduktion kaum praktikabel ist, müssen in diesen Fällen entsprechende IT-Systeme mit geeigneten Eingabegeräten bzw. Sensorik bereitgestellt werden (Anforderung 19).

Die Erfassung erfolgt heute überwiegend durch optische Verfahren wie dem Scannen von Strich- oder QR-Codes auf dem Bauteil oder einem angebrachten Etikett (wobei ersteres aufwendiger jedoch weniger fehleranfällig ist). Seltener werden RFID-Tags eingesetzt. Diese ermöglichen ohne präzise Ausrichtung zu einer Lesestelle eine automatische Erfassung sobald

³ Anmerkung: In der Realität ist es häufig praktikabler Komponenten und Werkzeuge nach und nach und nicht auf einmal aufzunehmen, für dieses Modell soll das jedoch vernachlässigt werden. Zudem ist es sinnvoll einen Arbeitsschritt aufzuteilen, wenn er mehr Komponenten erfordert als ein Werker gleichzeitig fassen kann.

ein Bauteil in den Arbeitsbereich eingebracht wird und (sofern die Karosserie den Tag nicht zu stark abschirmt) auch ein nachträgliches Auslesen im verbauten Zustand. Der manuelle Aufwand (Planzeit) lässt sich damit reduzieren, jedoch kosten entsprechende Tags heute noch mehr als die Kennzeichnung mit aufgedruckten oder gravierten Codes und die Systeme sind meist komplexer und störanfälliger als die etablierten optischen Scanner.

Kleinteile werden bei größerer Varianz zunehmend in „intelligenten“, mit Signalgebern und / oder Sensoren ausgestatteten Regalen oder Behältern bereitgestellt, welche dem Werker die zu entnehmende Variante (und ggf. Anzahl) signalisieren und die korrekte Entnahme kontrollieren.

Ausrichten / Positionieren / Manipulieren

Anschließend bringt der Werker die aufgenommenen Komponenten (per Hand oder mit einem Handhabungsgerät) zum Werkstückträger oder der Karosserie, richtet sie grob aus und positioniert sie an der vorgesehenen Stelle.

Wenngleich dieser Vorgang trivial erscheinen mag, müssen für eine erfolgreiche Durchführung zahlreiche Anforderungen erfüllt sein. Zunächst müssen die geometrische Konsistenz und Baubarkeit (Anforderungen 1 und 2) gegeben sein, Toleranzeinflüsse dürfen die korrekte Positionierung nicht verhindern (Anforderung 3). Wie im Kapitel 2.2.4 erläutert, geht der Prototypenphase im Entwicklungsprozess eine umfassende virtuelle Absicherung voraus. Dadurch soll vor der Beschaffung der kostenintensiven Prototypenteile sichergestellt werden, dass die Konstruktion geometrisch konsistent und die Baubarkeit grundsätzliche gegeben ist. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass diese Anforderungen bereits zu Beginn der Prototypenproduktion weitgehend erfüllt sind. Aufgrund unzureichender Absicherung sowie der andauernden Entwicklung und damit einhergehenden Konstruktionsänderungen kann es jedoch insbesondere in frühen Phasen vorkommen, dass durch inkonsistente oder inkompatible Entwicklungsstände dennoch Probleme in diesen Bereichen auftreten.

Die Montagereihenfolge muss das kollisionsfreie Fügen erlauben (5. *Baubarkeit im Produktionssystem*), dabei wird ein adäquater Freiraum benötigt (6. *Zugänglichkeit der Montagestelle*). Der Vorgang muss entsprechend geplant sein, insbesondere muss eine realistische Planzeit vorgesehen sein (8. *Spezifikation wertschöpfender Montageprozesse*).⁴ Die korrekte Positionierung unter Ausschluss einer Beschädigung sollte konstruktiv sichergestellt bzw. zumindest unterstützt und ggf. prozessual abgesichert werden (Kontrolle im Prozess oder nachgelagert). Der Prozess sollte dabei so robust sein, dass über viele Wiederholungen hinweg unabhängig vom ausführenden Werker ein gleichbleibend gutes Ergebnis erzielt wird (12. *Fehlhandlungssicherheit und Montagequalität* sowie 4. *Montagegerechte Produktgestaltung*). Hilfsmittel wie beispielsweise Spiegel oder Lehren können die Positionierung deutlich erleichtern und Fehler vermeiden. Die Positionierung sperriger oder schwerer Lasten, wie beispielsweise das

⁴ Im Rahmen dieser Arbeit konnte insbesondere bei großen Bauteilen mit mehreren Aufnahme- bzw. Anbindungspunkten beobachtet werden, dass die korrekte Positionierung in der Praxis oftmals deutlich mehr Zeit beansprucht (und häufig mehrere Versuche erfordert) als durch den Montageplaner auf Basis theoretischer Betrachtungen angenommen bzw. vorgesehen. Zudem ist die Dauer des Positioniervorgangs stark vom Übungsgrad und den motorischen Fähigkeiten des jeweiligen Mitarbeiters abhängig.

Einbringen des vormontierten Cockpits in die Karosserie, wird heute meist durch Handhabungsgeräte unterstützt - sofern derartige Prozesse nicht bereits vollständig automatisiert erledigt werden. In diesen Fällen müssen die Anforderungen aus Punkt 18. *Werkzeuge und Sonderbetriebsmittel (SBM)* erfüllt sein. Sind Menschen involviert, müssen stets auch die Anforderungen hinsichtlich der Arbeitssicherheit und Ergonomie betrachtet werden (13.). Im Kontext des Aufnehmens, Verbringens und Positionierens ist besonders auf das Bauteilgewicht, eine ergonomische Körperhaltung sowie Verletzungsgefahren durch Einklemmen oder scharfe Kanten zu achten.

Sofern der Arbeitsschritt keine neuen Komponenten umfasst (das Aufnehmen entfällt), werden an dem bestehenden Aufbau Manipulationen vorgenommen, beispielsweise Leitungen verlegt, Justagen durchgeführt oder Oberflächen gereinigt. Im Wesentlichen gelten dabei die gleichen Anforderungen wie im letzten Absatz besprochen.

Verbinden

Als letzte Tätigkeit in diesem Modell eines Montageschritts wird eine Verbindung zwischen dem (den) neu eingebrachten Teil(en) und dem bestehenden Aufbau hergestellt, beispielsweise durch Einrasten eines bzw. mehrerer Clips oder dem Anzug einer bzw. mehrerer Schraubverbindungen. Dafür ist es aus Sicht des Werkers primär erforderlich, dass die Verbindungsstellen zugänglich sind (6. *Zugänglichkeit der Montagestellen*). Erfolgt die Verbindung mittels eines Werkzeugs, muss die Stelle auch mit diesem erreichbar und das Werkzeug für den Verbindungstyp sowie die anzuwendenden Parameter geeignet sein (18. *Werkzeuge und Sonderbetriebsmittel*). Die Verbindungsparameter (7. *Prozessparameter Verbindungstechnik*) müssen für eine korrekte Verbindung geeignet sein und entweder explizit, wenn sie durch den Werker manuell eingestellt werden (z.B. manueller Drehmomentschlüssel) oder implizit, in Form eines fest eingestellten / programmierten Werkzeugs (z.B. Handschrauber mit festgelegtem Drehmoment, digitale Schraubsysteme mit entsprechendem Programm) vorliegen. Der Vorgang muss vollständig geplant und dokumentiert sowie ausreichend Zeit für die Ausführung allokiert sein (8. *Definition wertschöpfender Montageprozesse*).

Auch hier lassen sich bei genauerer Betrachtung jedoch noch einige weitere Voraussetzungen und Anforderungen identifizieren. Um die Verbindung herstellen zu können, muss die geometrische Konsistenz, konkret die korrekte Ausrichtung der Verbindungspunkte zueinander (ohne übermäßigen Kraftaufwand durch den Werker) gegeben sein (1. *Geometrische Konsistenz der Konstruktion*). Auch bei ungünstigen Toleranzpaarungen darf es nicht zu Verspannungen oder Verzug kommen (3. *Toleranzeinflüsse*). Die Verbindungselemente müssen ihren beabsichtigten Zweck erfüllen, also zuverlässig und dauerhaft eine feste oder auch bewegliche Verbindung herstellen. Unzureichende Verbindungskonzepte können von Störgeräuschen bis hin zum Versagen sicherheitskritischer Konstruktionen vielfältigste negative Auswirkungen nach sich ziehen. Die funktionale Produktabsicherung ist zwar nicht Aufgabe der Montage, jedoch ist es natürlich zweckmäßig, dass sie offensichtlich untaugliche Verbindungen frühzeitig an die Konstruktion meldet.

Im Rahmen der *montagegerechten Produktgestaltung* (4.) ist es zweckmäßig, so wenig Verbindungselemente wie notwendig vorzusehen, und wo möglich werkzeuglose Verfahren mit

kürzeren Montagezeiten zu bevorzugen. Im Sinne der Nacharbeit bzw. Reparierbarkeit sollten insbesondere im Umfeld von Verschleißteilen beschädigungsfrei lösbare Verbindungen eingesetzt werden. Verbindungskomponenten und Verbindungsparametersätze sollten dabei möglichst vereinheitlicht sein, um unnötige Varianz und Verwechslungsgefahr zu vermeiden.

Hinsichtlich der *Fehlhandlungssicherheit und Montagequalität* (12.) ist darauf zu achten, dass die Verbindungsreihenfolge wo erforderlich eingehalten wird, die richtigen Parameter angewendet und keine Verbindungen vergessen werden. Dies kann beispielsweise durch eine Codierung der Schraubenköpfe und entsprechende Schrauber mit Zählfunktion erreicht werden. Für sicherheitskritische Verschraubungen werden meist digitale Schraubsysteme eingesetzt, die den Drehmomentverlauf und weitere Parameter erfassen, auswerten und für Dokumentationszwecke speichern (bzw. an entsprechende Datenbanken weiterleiten). Da bestimmte Verbindungselemente nicht mehrfach verwendet werden dürfen, muss der Umgang mit Ausschuss so geregelt sein, dass ein versehentlicher erneuter Verbau ausgeschlossen ist.

Wie beim Aufnehmen und Positionieren sind auch beim Verbinden Aspekte der *Ergonomie und Arbeitssicherheit* (13.) zu berücksichtigen, insbesondere Montagekräfte und monotone Belastungen (z.B. Überlastung der Daumengelenke beim Eindrücken von Clips) sowie Belastungsspitzen, die bei Verschraubungen mit hohen Drehmomenten auftreten können. Auch auf eine ergonomische Körperhaltung ist natürlich, wie bei praktisch allen Montagetätigkeiten, zu achten.

4.2.3 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Abschnitt wurden Aspekte und Eigenschaften diskutiert, die im Rahmen der Serienentwicklung aus Sicht der Montage abgesichert werden müssen, um eine problemlose Serienmontage des Produkts im geplanten Produktionssystem sicherzustellen. Die identifizierten Punkte können auch als Anforderungen interpretiert werden, welche das Entwicklungsergebnis (Produkt, Produktionssystem und Prozesse) nach Abschluss der Entwicklung erfüllen muss. Zunächst wurden diese Anforderungen gesammelt und kategorisiert. Anschließend wurde ein Modell eines Montageschritts eingeführt, um die im Montageablauf bei verschiedenen Tätigkeiten jeweils relevanten Punkte zu diskutieren. Nun kann abschließend bewertet werden, welche Aspekte für die produktionsbegleitende Absicherung im Prototypenbau geeignet sind, welche Einschränkungen gelten und wo die Grenzen liegen.

Bei der Reflektion der gesammelten Anforderungen wird schnell deutlich, dass einige dieser in jedem Umfeld, egal ob Prototypenbau, Unikatproduktion oder Serie zwingend erfüllt sein müssen, um das Produkt montieren zu können. Beispielsweise muss die geometrische Konsistenz ebenso wie die geometrische Baubarkeit gegeben sein, ansonsten ist eine Montage unmöglich.⁵ Defizite in diesen Bereichen würden in jedem Montageumfeld unmittelbar auffallen, sie können daher im Prototypenbau (einen ausreichend aktuellen und konsistenten

⁵ In der Praxis werden im Prototypenbau geringfügige geometrische Inkonsistenzen gelegentlich durch manuelle Nachbearbeitung oder improvisierte Befestigungen „gelöst“ bis korrigierte Komponenten verfügbar sind. Dies kann sich jedoch negativ auf die Erprobungstauglichkeit der Prototypen und die Validität der mit ihnen durchgeführten Versuche auswirken und sollte daher vermieden werden.

Konstruktions- und Teilestand vorausgesetzt) gut abgesichert werden. Dabei kann die Erfüllung der Anforderung sogar implizit aus dem Ausbleiben entsprechender Problemmeldungen geschlossen werden, eine explizite Prüfung ist nicht erforderlich.

Bei einigen anderen Aspekten verhindern Unzulänglichkeiten im Umfeld des Prototypenbaus die Montage zwar nicht, unter Serienbedingungen würden sie eine erfolgreiche Montage jedoch unmöglich machen. Ist eine Verbindungsstelle mit dem vorgesehenen Werkzeug nicht erreichbar, kann der Werker im werkstattähnlichen Prototypenbau eventuell auf ein anderes Werkzeug ausweichen. Wurden dem Werker falsche Komponenten geliefert, fehlen Bauteile oder sind diese (z.B. aufgrund mangelhafter Verpackung) beschädigt, kann Ersatz bestellt und dessen Lieferung abgewartet werden. Funktioniert ein SBM nicht wie geplant, kann der Prozess bei wenigen Wiederholungen und geringem Zeitdruck mit erhöhtem Kraft- und Zeitaufwand oder der Hilfe eines weiteren Werkers bewältigt werden. Unter Serienbedingungen wären diese Probleme hingegen nicht ad-hoc lösbar bzw. würden sich deutlich auf die erreichbaren Stückzahlen oder den Personalbedarf auswirken. Sie erschweren die Montage jedoch auch im Prototypenbau derart, dass sie mit hoher Sicherheit auffallen. Hier ist sicherzustellen, dass Defizite zuverlässig dokumentiert und einer Lösung zugeführt werden.

Die dritte Gruppe bilden Aspekte, die zwar grundsätzlich in jedem Umfeld abgesichert werden können, deren Bewertung jedoch voraussetzt, dass die geplanten Serienprozesse und Parameter präzise und konsequent eingehalten werden. Die Vollständigkeit, Korrektheit und mit Einschränkungen die Planzeit der geplanten Montageschritte, deren Dokumentation (Arbeitsanweisungen), ihre Abfolge (Abtaktung) sowie damit verbunden die Baubarkeit im geplanten Produktionssystem zählen zu dieser Kategorie. Auch Defizite bei den Prozessparametern können nur identifiziert werden, wenn entsprechende Vorgaben vorliegen und auch stringent eingehalten werden.

Bei einigen Anforderungen fallen Defizite hingegen auch dann nicht unbedingt auf, wenn die Prototypenmontage exakt nach den geplanten Prozessen erfolgt. Die Gründe dafür liegen im Umfeld, den geringeren Stückzahlen, dem erfahrenen aber untrainierten Personal und dem geringeren Zeitdruck. Sie lassen sich jedoch durch eine gezielte Betrachtung in weiten Teilen durchaus schon während der Prototypenphase bewerten, was im Hinblick auf die frühzeitige Problemerkennung anzustreben ist. Schlecht zu demontierende Komponenten (Reparierbarkeit, montagegerechten Produktgestaltung) werden nicht unbedingt als Problem erkannt, wenn bei den geringen Stückzahlen zufälligerweise kein Defekt auftritt, der eine Demontage erfordert. Defizite bei der Fehlhandlungssicherheit bleiben möglicherweise unentdeckt, wenn Montagefehler in Folge von Unachtsamkeit, Ablenkung oder Überforderung schlicht nicht passieren oder ohne Meldung korrigiert werden. Qualitative Mängel, deren Ursache in einer ungünstigen Konstruktion liegen werden eventuell der unzureichenden Passgenauigkeit der Prototypenteile zugeschrieben, wodurch die Kernursache ungelöst bleibt. Auch ergonomisch ungünstige Haltungen und Belastungen sind bei wenigen Wiederholungen unproblematisch, können bei vielen hundert Einheiten pro Tag jedoch zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen. Effizienz, kurze Wege und die Minimierung der nicht unmittelbar wertschöpfenden Tätigkeiten spielen im Prototypenwerk eine untergeordnete Rolle, in der Serie sind sie hingegen wichtig für die Profitabilität und Konkurrenzfähigkeit. Derartige Faktoren sollten daher explizit

abgeprüft und die Werker entsprechend sensibilisiert werden. Wichtiger als eine vollständige Absicherung mit eindeutigem Ergebnis ist dabei, insbesondere in frühen Phasen, zunächst die Identifikation potenziell problematischer Umfänge, um sie im Nachgang bzw. bei weiteren Absicherungsmaßnahmen einer gezielten Analyse unterziehen zu können.

Schließlich lassen sich gewisse Aspekte in der physischen Welt außerhalb der echten Serienproduktion gar nicht oder nur mit inakzeptablem Aufwand abbilden, z. B. die Taktstabilität bei variierendem Modellmix oder auch die Verwechslungsgefahr bei Komponenten verschiedener Modelle auf einer MMAL. Aufgrund der außerhalb des Serienwerks meist nicht vorhandenen Fördertechnik lassen sich auch ergonomische Aspekte wie die Körperhaltungen zwischen Prototypenbau und Serie nur begrenzt vergleichen. Automatisierungstechnik und (Groß-) Anlagen stehen außerhalb des Serienwerks ebenfalls meist nicht zur Verfügung, weshalb damit verbundene Prozesse in der Prototypenmontage nicht im Detail abgesichert werden können. Daher müssen für diese Umfänge bzw. Aspekte andere Wege gewählt werden, um sicherzustellen, dass Defizite nicht erst im Rahmen der Vorserienproduktion erkannt werden.

Die Ausführungen in diesem Abschnitt zeigen, dass viele Aspekte eines in Entwicklung befindlichen Serienmontagesystems bereits während der Prototypenmontage produktionsbegleitend evaluiert werden können. In anderen Fällen ist eine Absicherung zumindest in Teilen bzw. unter bestimmten Voraussetzungen (z.B. Einhaltung der geplanten Abläufe) möglich. Da sich jedoch gewisse Umfänge und Eigenschaften im Umfeld der Prototypenproduktion nicht valide beurteilen lassen, ist es jedoch auch wichtig diese Lücken aufzuzeigen, damit eine angemessene Validierung bzw. Prävention in anderem Rahmen erfolgen kann.

4.3 Anwendungsmöglichkeiten für Assistenzsysteme

Im Abschnitt 4.1 wurden die Gestaltungsmöglichkeiten bei der Absicherung von Montageprozessen in Prototypenbau und Vorserie aufgezeigt, das Reifegradmodell diskutiert und exemplarisch einige Absicherungsmethoden aus der industriellen Praxis vorgestellt. Dabei wurde die produktionsbegleitende Prozessabsicherung in der Prototypenmontage aufgrund ihrer Optimierungspotenziale als primärer Einsatzbereich für die zu entwickelnde Methode ausgewählt. Daran anschließend folgte in Abschnitt 4.2 eine ausführliche Analyse der im Hinblick auf die Serienmontage abzusichernden Aspekte und Prozesseigenschaften. Basierend auf diesen Betrachtungen und den im Kapitel 3.1 untersuchten Praxisdefiziten wird im Folgenden diskutiert, welchen Mehrwert ein Assistenzsystem in diesem Umfeld bieten und wie es zur Optimierung der Prozessabsicherung beitragen könnte. Dabei wird von einem hypothetischen System ausgegangen, das speziell für die Bedürfnisse der Prototypenmontage entwickelt wird und vielfältige Funktionen umfassen könnte, welche über den typischen Umfang heutiger Systeme für die Serienmontage hinausgehen. Es wird weiterhin angenommen, dass die erforderlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz eines solchen Systems, insb. die Datenverfügbarkeit gegeben seien.

Wie im letzten Abschnitt dargelegt, stellt die Kenntnis des jeweils aktuellen Planstands der Montageabläufe und ihre strikte Einhaltung eine wesentliche Voraussetzung für die produktionsbegleitende Prozessabsicherung dar, insbesondere wenn Aspekte der produktbezogenen

Prozessabsicherung bewertet werden sollen. Die aufgrund der andauernden Serienentwicklung laufend stattfindenden Änderungen an Produkt und Prozessen sowie das Fehlen einer angemessen schnellen und effizienten Möglichkeit zur Kommunikation dieser Änderungen aus der Konstruktion und Planung in den Prototypenbau stehen dieser Voraussetzung entgegen. Assistenzsysteme ermöglichen die situationsbezogene Bereitstellung von Informationen im Montagegeschehen und können so den Werker durch den Prozess leiten. Mittels Sensorik können sie auch so gestaltet werden, dass die Einhaltung der vorgegebenen Arbeitsinhalte und ihrer Abfolge kontrolliert wird. Sofern es gelingt die Daten der Serienplanung automatisiert an das Umfeld und die Anforderungen der Prototypenmontage zu adaptieren, kann der Einsatz eines solchen Systems dort die Grundlage für eine systematische und konsequente Anwendung und Überprüfung der geplanten Prozesse bilden.

In Abhängigkeit des Erprobungszwecks müssen bei der Montage eines Prototyps häufig gewisse Sonderumfänge berücksichtigt werden, beispielsweise der Verbau zusätzlicher Leitungen für Diagnosesysteme oder Steuergeräte mit einem bestimmten Softwarestand. Ein Assistenzsystem könnte den Werker auf derartige Besonderheiten hinweisen, um Versäumnisse und damit zeitaufwändige Nacharbeit zu vermeiden. Auch kann ein solches System auf Änderungen an Vorgaben wie z.B. Prozessparametern aufmerksam machen und ggf. die Einhaltung der neuen Vorgaben kontrollieren. Somit kann vermieden werden, dass ein Werker ohne die geänderten Anweisungen zu beachten die ihm bekannten, alten Parameter weiter anwendet. Die Fehlervermeidung und damit die Reduzierung von Nacharbeit und Ausschuss sowie die Steigerung der Produktqualität stellt in der variantenreichen Serienproduktion eine wesentliche Motivation für die Nutzung von Werkerassistenzsystemen dar. Auch in der Prototypenmontage kann ein Assistenzsystem diesen Zweck erfüllen, beispielsweise indem mittels Prüfung beim Verbau sichergestellt wird, dass die richtigen Komponenten (entsprechend der von der Entwicklung vorgegebenen Stückliste) verbaut werden. Somit lässt sich der korrekte Aufbau der Prototypen sicherstellen, was im Hinblick auf die Validität der mit ihnen durchgeführten Erprobungen sehr wichtig ist. Die mit einem solchen System mögliche, automatisierte Datenerfassung kann außerdem herangezogen werden, um ohne den heute üblichen manuellen Aufwand eine umfassende Aufbaudokumentation für die Prototypen zu generieren.

Konnte ein Montageschritt im Prototypenumfeld ohne Probleme durchgeführt werden, kann davon ausgegangen werden, dass einige wesentliche Anforderungen erfüllt sind. Ein Assistenzsystem kann dokumentieren, welche Varianten bereits montiert wurden und damit Transparent machen, welche Prozesse bereits ausgeführt wurden und welche noch nicht. In Kombination mit der Anzahl der durchgeführten Wiederholungen kann dadurch für jeden Montageschritt der Reifegrad eingeschätzt werden. Sollten Probleme bei der Montage auftreten, müssen diese so umfassend wie möglich dokumentiert und schnellstmöglich an den Lösungsverantwortlichen adressiert werden. Dies stellt in der Praxis mehrere Herausforderungen dar.

Zum einen sind die Meldungen meist nicht standardisiert (Umfang, Inhalt und Gestalt), was häufig zu Unklarheiten und Rückfragen im Problemlösungsprozess führt. Zum anderen sind die Meldewege nicht immer klar definiert bzw. die Ansprechpartner bekannt, wodurch Probleme in ungünstigen Fällen mehrfach weitergereicht werden müssen bis sie den Verantwortlichen erreichen. Ist der Aufwand einer Meldung hoch, könnten Werker insbesondere bei

Defiziten, die sie als geringfügig einschätzen dazu tendieren von einer Meldung abzusehen. Andererseits sind zahlreiche Meldungen bezüglich desselben Problems bzw. zu einem bereits bekannten Defizit ebenfalls nicht zielführend. Wird ein Assistenzsystem mit Funktionalitäten aus dem Bereich des Problem- bzw. *Incident-Management*s ausgestattet, könnte es den Werker bei der Dokumentation von Auffälligkeiten unterstützen. Da es bereits über umfangreiche Daten zur jeweiligen Montagesituation verfügt, können Umfang und Qualität der Meldung gesteigert und gleichzeitig der Aufwand für ihre Erstellung reduziert werden. Auf Basis der Problemart und evtl. einer geführten Ursachenanalyse könnte das System entscheiden, an welche Stelle (z.B. Konstruktion, Planung, Logistik) eine Meldung adressiert wird. Werden für die einzelnen Produktumfänge oder Montagebereiche die zuständigen Konstrukteure oder Planer hinterlegt, ist sogar ein direkter Kontakt denkbar. Liegen zu einem Umfang (Bauteil, Prozessschritt) bereits Meldungen über Defizite vor, so kann dies dem Werker im Montageprozess angezeigt werden, um ihm zu signalisieren, dass das Thema bereits bekannt und keine erneute Meldung erforderlich ist. Erhält das System Rückmeldungen zum Bearbeitungsstatus können diese Informationen auch den Werkern angezeigt werden, um ihnen eine Transparenz zum Stand der gemeldeten Probleme zu geben. Somit kann die Motivation zur Identifikation und Meldung von Defiziten gesteigert werden, bzw. es kann bei den Werkern der Eindruck vermieden werden, dass ihre Meldungen keine adäquate Aufmerksamkeit erhalten.

Wurde ein Montageprozess bei einer gewissen Anzahl von Fahrzeugen ohne Probleme ausgeführt (was aus dem Fehlen entsprechender Problemmeldungen abgeleitet werden kann), so kann ein gewisser Reifegrad angenommen werden. In diesem Fall könnte ein Assistenzsystem zur Absicherung weniger offensichtlicher Aspekte damit beginnen, den Werker gezielt aufzufordern bestimmte Aspekte eines Montageschritts zu bewerten. In einem Schritt, welcher das Kontaktieren einer elektrischen Steckverbindung umfasst, könnte der Werker beispielsweise gebeten werden zu prüfen, ob im Umfeld ein weiterer Anschluss existiert an den die betreffende Leitung fälschlicherweise angeschlossen werden könnte (Fehlhandlungssicherheit). Somit können mit geringem Aufwand zunächst grundlegende Aspekte wie die Baubarkeit implizit und anschließend gezielt tätigkeitsspezifisch weitere Eigenschaften geprüft werden. Bei Änderungen an Prozessen oder dem Produkt ist es ggf. erforderlich bestimmte Aspekte erneut zu bewerten. Auch hier könnte ein Assistenzsystem helfen den Überblick zu behalten, da sich genau angeben lässt, welcher Prozessschritt in welcher Version mit welchem Entwicklungs- und Teilestand wie häufig und von welchen Werkern durchgeführt wurde. Dadurch kann der Absicherungsgrad transparent gemacht und der Reifegrad im Projekt besser eingeschätzt werden.

Die Kommunikation und der Informationsaustausch zwischen Konstruktion bzw. Produktentwicklung, Montageplanung und Prototypenwerk ließe sich gegenüber den heute etablierten Prozessen mit einem derartigen System deutlich verbessern und beschleunigen. Die Serienentwicklung und insbesondere die Problemlösung und Prozessoptimierung stellen iterative Prozesse dar. Michalos, Maris et. al. bezeichnen den Ablauf als „*design-evaluate-redesign-Loop*“ und argumentieren, dass ein engerer Austausch („*closed-loop*“) zwischen Planung und Shopfloor die Abläufe beschleunigen, Änderungen erleichtern und die Flexibilität steigern könnte [11, S. 88]. Es ist also anzunehmen, dass die Zyklen aus Entwurf, Erprobung und Korrektur bzw. Lösungsbestätigung von einer schnellen Absicherung und einer optimierten

Kommunikation profitieren könnten. Durch eine frühzeitige, schnelle Reifesteigerung und umgehende Validierung auch kleiner Änderungen lassen sich zudem die Entwicklungsrisiken reduzieren (vgl. [58, S. 55 f.]).

Von reiferen, stabileren Montageabläufen profitiert auch die Prototypenmontage selbst. Die anfallenden Daten ermöglichen zudem gezielte Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz und Qualität. Indem Abläufe transparent gemacht und darauf aufbauend optimiert werden, lassen sich Stabilität und Planbarkeit steigern und letztlich Verzögerungen vermeiden, welche sich negativ auf die *time-to-market* des Produkts auswirken könnten.

In diesem Abschnitt wurden einige Ansätze präsentiert, die potenzielle Antworten auf die zweite Forschungsfrage „Wie kann ein Assistenzsystem die Absicherung in der Prototypenmontage unterstützen?“ darstellen. Theoretisch könnte ein angepasstes und erweitertes Montageassistenzsystem im Prototypenbau in einigen Bereichen signifikanten Mehrwert bieten. Um die Eignung der vorgestellten Ansätze bewerten und die Fragestellung damit valide beantworten zu können, müssen diese umgesetzt und in der Praxis angewendet werden.

Im nächsten Schritt stellt sich daher die Frage, ob ein solches System realisiert werden kann und wie es gestaltet sein müsste. In einigen Branchen des produzierenden Gewerbes sind Assistenzsysteme für die manuelle Serienmontage bereits etabliert, entsprechende Lösungen sind am Markt verfügbar. Auch für das betriebliche Problemmanagement existieren Lösungen, wie beispielsweise Ticket-Systeme. Und Software, die effiziente Kommunikation und Kollaboration trotz räumlicher Distanz ermöglicht, hat mit dem Trend zur Mobilarbeit in den letzten Jahren große Verbreitung erreicht. Für einige Aspekte des Ansatzes existieren also bereits Lösungen, die eine prinzipielle technische Machbarkeit nahelegen. Im Rahmen dieser Arbeit werden existierende Konzepte kombiniert, erweitert und mit innovativen Ansätzen ergänzt, um eine neuartige, für den geschilderten Anwendungsfall optimierte Lösung zu entwickeln und prototypisch zu implementieren. Durch die Entwicklung soll einerseits die Frage nach den Gestaltungsmöglichkeiten bei einem solchen System beantwortet werden, andererseits soll die Anwendung des resultierenden Software-Prototyps in einer Studie die Validierung der Methode ermöglichen.

4.4 Lösungshypothesen und Erfolgskriterien

Im Folgenden werden die Ausführungen des letzten Abschnitts in Form von Lösungshypothesen zusammengefasst. Diese Hypothesen stellen dar, wie die Methode (und die entsprechende technische Lösung, die ihre Anwendung ermöglicht) die bestehenden Defizite beheben oder reduzieren sollen, um der übergeordneten Zielsetzung näher zu kommen (vgl. Abschnitt 1.2). Anschließend werden konkrete Erfolgskriterien definiert, anhand derer die Tauglichkeit des Ansatzes später bewerten werden soll. Sind diese Kriterien erfüllt, kann von einer Verbesserung im Sinne der Zielsetzung ausgegangen und die Entwicklung somit als Erfolg gewertet werden.

Dieser Arbeit liegt die Annahme zugrunde, dass es für den wirtschaftlichen Erfolg eines Unternehmens in der Automobilindustrie anzustreben ist, die Serienentwicklung und damit die

time-to-market sowie die Entwicklungskosten möglichst zu minimieren und dabei dennoch Entwicklungsergebnisse zu erzielen, die eine schnelle und reibungslose Realisierung der Serienproduktion in der erforderlichen Qualität, im geplanten Umfang (Stückzahlen) und zu den vorgesehenen Kosten erlauben.

Die übergeordnete Zielsetzung lässt sich in drei Punkten zusammenfassen:

- Z1) Serienentwicklung beschleunigen, *time-to-market* verkürzen.
- Z2) Entwicklungskosten senken, Aufwand für die Absicherung minimieren.
- Z3) Absicherungsqualität steigern und Entwicklungsrisiken frühzeitig reduzieren.

Weiterhin wird davon ausgegangen, dass es bei der Absicherung im Rahmen der Serienentwicklung zweckmäßig ist, Defizite frühzeitig zu identifizieren und zu korrigieren, da die Änderungskosten mit dem Fortschreiten der Entwicklung drastisch ansteigen. Vor diesem Hintergrund wurden im Abschnitt 3.1 einige Defizite und Optimierungspotenziale in der industriellen Praxis bei der Absicherung geplanter Montagesysteme identifiziert:

- D1) Die Absicherung des geplanten Produktionssystems folgt keiner systematischen Vorgehensweise, vielmehr erfolgt sie erfahrungsbasiert und situativ.
- D2) Zergliederte Zuständigkeiten und Kompetenzen führen zu einem Mangel an Transparenz, unzureichender Testabdeckung und hohem Kommunikationsaufwand.
- D3) Daten und Informationen sind nicht durchgängig verfügbar, Abläufe werden nicht systematisch durch Informationssysteme unterstützt.
- D4) Die Reifegradmessung im Stage-Gate Prozess stellt aufgrund fehlender Daten und objektiver Bewertungsmodelle eine Herausforderung dar.
- D5) Defizite im Problem- und Änderungsmanagement (Nachhaltige Fehlerbehebung, Wissensmanagement) führen zu Verzögerungen, vermeidbaren technischen Änderungen und hohem Kommunikationsaufwand.
- D6) Die Abbildung von kurzfristigen Produktkonzeptänderungen bei Hardwareprototypen stellt aufgrund der Verfügbarkeit entsprechend angepasster Teile und inkonsistenter Entwicklungsstände eine Herausforderung dar.

Insbesondere konnte festgestellt werden, dass die Prozessabsicherung heute nicht systematisch erfolgt und Potenziale zur Absicherung von Serienmontageprozessen in der Prototypenmontage nicht angemessen genutzt werden. Daraus wurde der Bedarf nach einer Methode abgeleitet, welche die heute in der Praxis bestehenden Defizite auflöst und die Möglichkeiten zur produktionsbegleitenden Absicherung in der Prototypenmontage sowie die Potenziale moderner Informationssysteme stärker nutzt. Die folgenden Lösungshypothesen legen dar, wie die in der Praxis identifizierten Defizite (D1-D6) reduziert und die übergeordneten Zielsetzungen (Z1-Z3) erreicht werden sollen.

Lösungshypothese 1 – Absicherungseffizienz

Reduzierung des Absicherungsaufwands bei gleichzeitiger Steigerung der Absicherungsqualität und der Testabdeckung.

Gelingt es eine Methode zu entwickeln, die mithilfe eines Assistenzsystems eine systematische Absicherung der geplanten Montageprozesse produktionsbegleitend im Rahmen der (für die funktionale Produktabsicherung ohnehin erforderlichen) Prototypenmontage ermöglicht ohne diese zu beeinträchtigen, kann der gesamte Absicherungsaufwand durch die bessere Vorbereitung, Fokussierung und Kürzung oder gar den Entfall anderer Absicherungsmaßnahmen gesenkt werden, was sich positiv auf Z2 auswirkt. Zudem kann die Absicherungsqualität aufgrund der größeren Testabdeckung (Varianten) und Seriennähe im Vergleich zu anderen Absicherungsmaßnahmen sowie der höheren Anzahl der Wiederholungen gesteigert werden (Z3, D2). Das Defizit D1 kann damit weitgehend aufgelöst werden, wobei die existierende Erfahrung der Experten natürlich in die Konzeption der Methode einfließen muss. Weiterhin trägt eine derartige Lösung zur durchgängigen Verfügbarkeit und effizienten Nutzung von Daten bei (D3).

Erfolgskriterien:

- E1.1) Die Lösung muss es erlauben, die für die Serie geplanten Prozesse möglichst akkurat im Umfeld der Prototypenmontage anzuwenden, um eine valide Erprobung und Bewertung zu ermöglichen.
- E1.2) Die Lösung muss die Einhaltung der Vorgaben kontrollieren bzw. Abweichungen dokumentieren. Dabei muss eine gewisse Flexibilität erhalten bleiben.
- E1.3) Durch die Anwendung der Lösung dürfen weder Verzögerungen noch personeller Mehraufwand verursacht werden.
- E1.4) Bei Anwendung der Methode muss sich in der Praxis ein substanzieller Absicherungsgrad (horizontale und vertikale Testabdeckung) erzielen lassen.
- E1.5) Der Absicherungsgrad muss jederzeit transparent und quantifizierbar sein.
- E1.6) Die Methode muss zuverlässig valide Absicherungsergebnisse liefern.

Lösungshypothese 2 – Optimierung der Serienentwicklung

Frühzeitige Reifegradsteigerung zur Reduzierung von Ungewissheit bzw. Risiko sowie höhere Effizienz, Geschwindigkeit und Transparenz im Serienentwicklungsprozess.

Der Einsatz eines Assistenzsystems ermöglicht einen direkten Informationsfluss aus der Entwicklung und Planung hin zum Shopfloor (D3). Im Zusammenspiel mit der effizienten Dokumentation und Meldung von Problemen (D5) lassen sich damit schnellere Problemlösungs- und Entwicklungszyklen realisieren. Die kontinuierliche, produktionsbegleitende Absicherung in der Prototypenmontage ermöglicht dabei eine frühzeitigere Erkennung von Defiziten als sie mit zeitdiskreten Absicherungsmaßnahmen erreicht werden könnte.

Der Verlauf der Reife und Probleme, der damit erzielt werden soll, ist in **Abbildung 30** schematisch dargestellt. Werden anstelle weniger großer Iterationen zu bestimmten Zeitpunkten (t_1 - t_3) mit weitgehend überarbeiteten Konstruktions- und Planungsständen kontinuierlich kleinere und entkoppelte Optimierungszyklen realisiert, können Konzepte oder Prozesse mit kurzem Vorlauf geprüft werden, um eine schnelle Rückmeldung zu erhalten. Die Reife kann dadurch frühzeitig gesteigert werden, Entwicklungsrisiken und Änderungskosten sinken. Im günstigsten Fall kann der gesamte Serienentwicklungsprozess verkürzt werden, indem die Entwicklungszielsetzung und die Serienreife früher erreicht werden. Dies würde sich insbesondere auf Z1 und Z2 positiv auswirken, im Hinblick auf die Absicherung von Änderungen und die mit ihnen verbundenen Risiken auch auf Z3.

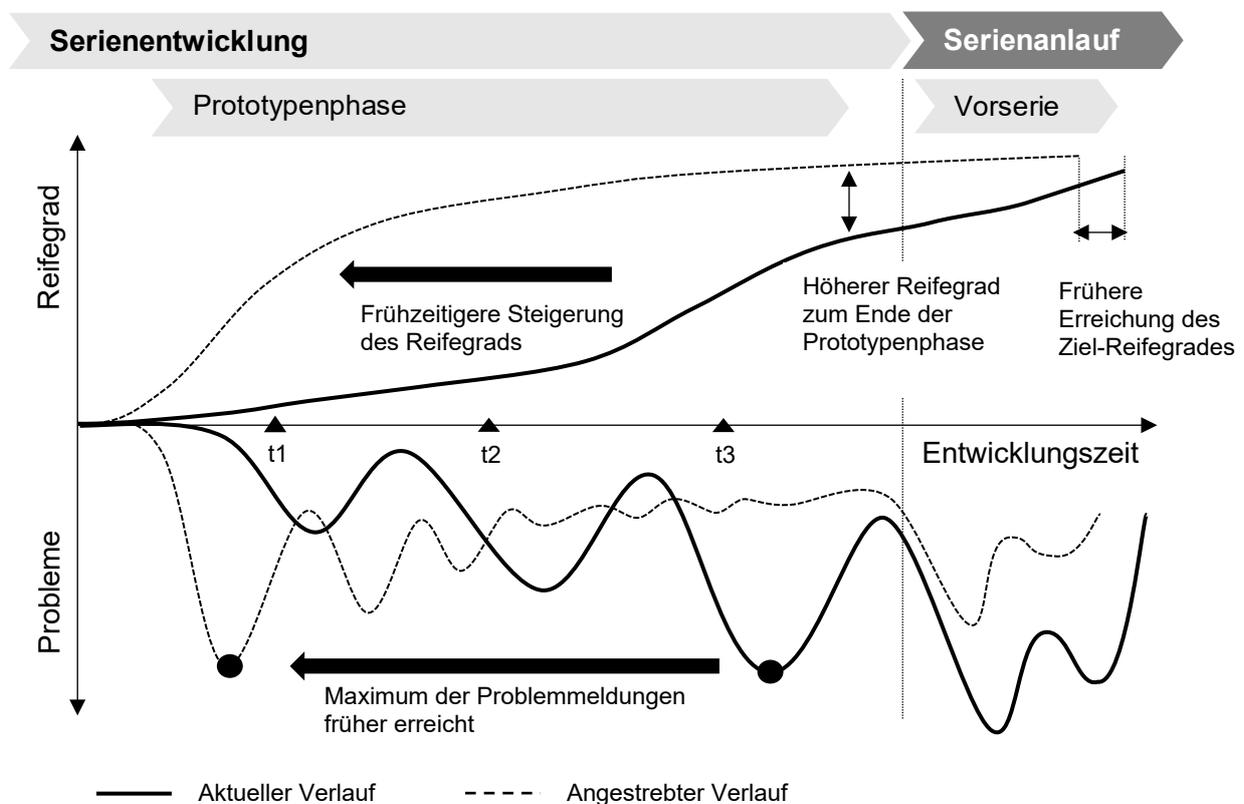


Abbildung 30: Angestrebter Verlauf von Reifegrad und Problemmeldungen (i.A.a. [72, S. 395])

Die automatisierte Erfassung von Daten zum Absicherungsfortschritt (betrachtete Umfänge, Aspekte und Eigenschaften) liefert einerseits eine höhere Transparenz als bisher etablierte Methoden, andererseits ermöglicht sie eine objektiviertere, standardisierte und kontinuierliche Reifegradmessung (D2, D4). Diese bildet eine solidere Basis für strategische Entscheidungen im Fahrzeugentwicklungsprojekt als die heute etablierte Messung der Reife zu diskreten Zeitpunkten und steigert die Vergleichbarkeit zwischen Projekten.

Erfolgskriterien:

- E2.1) Aus den Planungsdaten der Serienmontageplanung muss automatisiert ein Prozess abgeleitet werden, der die Eigenheiten und spezifischen Umfänge der Prototypen berücksichtigt, sich im Umfeld der Prototypenmontage anwenden lässt und dabei so wenig wie möglich von dem für die Serie geplanten Ablauf abweicht. Nur eine automatisierte Lösung ohne manuelle Planungstätigkeiten ermöglicht die Realisierung schneller Änderungs- und Erprobungszyklen.
- E2.2) Die Methode muss dazu führen, dass Defizite systematisch und frühzeitig erkannt werden. Die Dauer zwischen der Einführung eines neuen Prozesses oder einer neuen Variante, der erstmaligen Bewertung und der Meldung eines Defizits (oder der Bestätigung) muss daher im Vergleich zu den heute etablierten Absicherungsmethoden sinken. Auch die maximale Dauer von Einführung bis zur Meldung eines Defizits sollte kürzer ausfallen. Während der Vorserie und dem Hochlauf sollten keine Defizite mehr auftreten, deren Erkennung im Umfeld der Prototypenmontage möglich gewesen wäre.
- E2.3) Der Aufwand für die Meldung von Defiziten sollte auf ein Minimum reduziert werden. Eine Meldung muss dennoch alle potenziell für die Analyse und Behebung des Problems relevanten Informationen in anschaulicher Weise umfassen, um das Problemverständnis beim Empfänger zu begünstigen, den Kommunikationsaufwand durch Rückfragen zu reduzieren und eine schnelle, nachhaltige Lösung zu ermöglichen. Eine direkte Adressierung an den Lösungsverantwortlichen ist dabei wichtig, um den Prozess nicht unnötig zu verzögern. Zur Überprüfung dieses Kriteriums können typische Metriken aus dem Problemmanagement herangezogen werden. Eine reduzierte mittlere Problemlösungsdauer sowie eine sinkende Zahl lange ungelöster Probleme (sog. „Langläufer“) können als Indikatoren für einen effizienteren Prozess gewertet werden. Eine sinkende Zahl von Fällen, die mehrere Zyklen durchlaufen, bis eine akzeptable Lösung erreicht ist, deutet auf eine höhere Qualität und Nachhaltigkeit der Lösungsvorschläge hin, welche wiederum mit einem verbesserten Problemverständnis begründet werden kann.
- E2.4) Als Indikator für eine schnelle, frühzeitige Reifesteigerung im Rahmen eines Entwicklungszyklus müsste sich nach der Einführung eines neuen Konstruktions- bzw. Planstands ein kurzfristiger Anstieg der Problemmeldungen zeigen, der rasch abnimmt und bis zur nächsten Änderung auf niedrigem Niveau bleibt (angestrebter Verlauf in **Abbildung 30**). Bei einer Betrachtung der gesamten Prototypenphase sollte die Zahl der Problemmeldungen früher ihr Maximum erreichen und mit zunehmendem Entwicklungsfortschritt sinken. Weniger ausgeprägte Spitzen im Verlauf der Anzahl eingehender Problemmeldungen können auf kontinuierlichere Entwicklungszyklen mit geringerem Änderungsumfang hindeuten.
- E2.5) Auf Basis des Absicherungsgrades (vgl. E1.5) und der bekannten Defizite soll eine automatisierte und valide Reifegradmessung realisiert werden.

Lösungshypothese 3 – Effizientere und transparente Prototypenmontage

Mit einem Assistenzsystem lässt sich die Informationsbereitstellung in der Prototypenmontage verbessern und eine Prozessüberwachung realisieren. Die Effizienz der Montage steigt, indem die Informationssuche entfällt, Abläufe standardisiert und Nebentätigkeiten wie Dokumentation oder Kommunikation reduziert werden. Fehler können vermieden bzw. frühzeitig erkannt werden, was sich positiv auf die Qualität sowie die erforderliche Nacharbeit und damit einhergehende Verzögerungen auswirkt. Durch eine bessere Strukturierung der Abläufe steigt die Stabilität und Planbarkeit. Mittels automatisierter Erfassung von Daten zu den Montageabläufen lässt sich bei einem flächendeckenden Einsatz eine höhere Transparenz schaffen, was wiederum eine gezielte Optimierung ermöglicht. In Summe lassen sich so die erforderlichen Erprobungsträger schneller, zu geringeren Kosten, in höherer Qualität und Seriennähe mit vollständiger Dokumentation bereitstellen. Dadurch lassen sich Entwicklungsdauer und -kosten reduzieren (Z1 & Z2).

Erfolgskriterien:

- E3.1) Bei Anwendung der Lösung lässt sich die Durchlaufzeit in der Montage reduzieren.
- E3.2) Die zur Behebung erkannter Fehler / Defekte erforderliche Nacharbeit sinkt.
- E3.3) Die resultierende Produktqualität (im Sinne unentdeckter Fehler / Abweichungen) sowie die Seriennähe (Aufbau entsprechend der geplanten Prozesse unter Anwendung der vorgegebenen Parameter) steigen. Die Erprobungstauglichkeit der Fahrzeuge bzw. die Validität der mit ihnen durchgeführten Versuche steigt.
- E3.4) Unvorhergesehene Verzögerungen treten seltener und in geringerem Maße auf.
- E3.5) Ohne zusätzlichen manuellen Aufwand kann eine vollständige Dokumentation des Versuchsfahrzeugs und seines Montageprozesses erzeugt werden.
- E3.6) Die Lösung steigert die Transparenz in der Montage, beispielsweise indem Montagefortschritt und Durchlaufzeiten für jedes Fahrzeug sowie Kennzahlen zu den Arbeitsstationen erfasst und dargestellt werden können.

4.5 Grobkonzept

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode zur Absicherung von Serienmontageprozessen im Prototypenbau konzentriert sich auf die, durch ein Assistenzsystem unterstützte, produktionsbegleitende Prüfung und Bewertung der geplanten Montageabläufe. Im Folgenden wird ein Überblick über die Methode und ihre wesentlichen Elemente gegeben. Die Ausarbeitung der Bestandteile als Vorbereitung für die Implementierung des Assistenzsystems folgt im nächsten Kapitel. Der Ansatz lässt sich in drei wesentliche Bestandteile gliedern, wie in **Abbildung 31** dargestellt.

Um überhaupt eine Absicherung der Serienprozesse in der Prototypenmontage vornehmen zu können, muss diese zunächst befähigt werden die geplanten Serienprozesse anzuwenden. Die Informationsverfügbarkeit stellt dabei heute im Vergleich zum physischen Umfeld den

limitierenden Faktor dar. Daher bildet die Realisierung einer analog zur Serie arbeitenden Prototypenmontage mithilfe eines Assistenzsystems, welches die Informationen zu den geplanten Serienprozessen bereitstellt, den ersten Baustein und das Fundament der Methode.

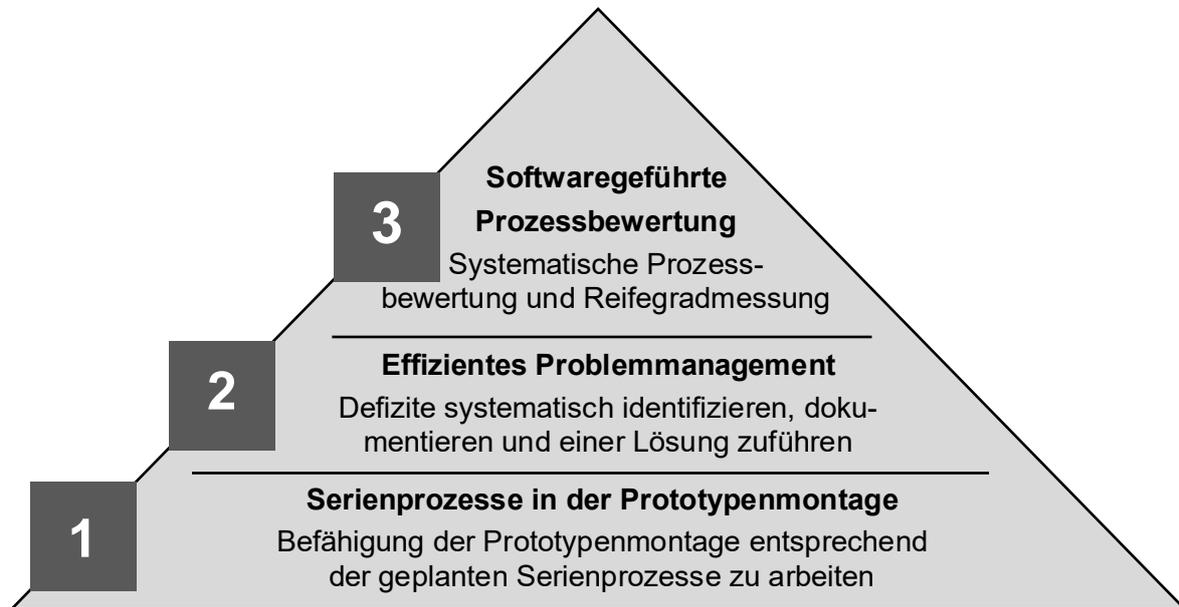


Abbildung 31: Die drei Kernbestandteile der vorgeschlagenen Methode

Da Produktkonzepte in der Serienentwicklung noch nicht ausgereift und Montageprozesse noch nicht vollständig geplant und optimiert sind sowie laufend Änderungen einfließen, werden bei der Montage insbesondere zu Beginn der Prototypenphase Probleme auftreten. Auch wenn die Prototypenmontage gegen Ende der Serienentwicklung reibungslos verläuft und das Projekt vermeintlich einen hohen Reifegrad erreicht hat, können aufgrund des anderen Umfelds und zusätzlicher Anforderungen Schwierigkeiten beim Anlauf der Produktion im Serienwerk auftreten. Steinhäuser et. al. [187] stellen dies in einem Modell mit drei Reifestufen dar (vgl. **Abbildung 32**). Dieses Modell lässt sich auf die Prototypenmontage übertragen. Verhindern oder erschweren Defizite in Produkt oder Prozess die Montage, so liegt der Reifegrad bei 0. Kann die Montage im Prototypenumfeld ohne größere Probleme wie geplant durchgeführt werden, so ist mindestens den Reifegrad 1 erreicht. Ist eine Montage unter den vorgesehenen Serienbedingungen möglich und werden dabei die gesetzten Leistungs- und Qualitätsziele erfüllt, so besitzen Produkt und Produktionssystem den Reifegrad 2.

Zu Beginn der Prototypenphase ist trotz der vorhergehenden virtuellen Absicherung davon auszugehen, dass einige Umfänge noch nicht der Reifestufe 1 entsprechen und korrigiert werden müssen. Die Assistenzfunktionen sollen den Werker in dieser Phase dazu befähigen signifikante Defizite im Produktkonzept zu melden und zusammen mit den Montageplanern, aufbauend auf den vorhandenen Planungsdaten schnell einen grundsätzlich vollständigen und funktionierenden, wenngleich noch nicht vollständig optimierten Montageablauf zu erarbeiten. Dieser ermöglicht anschließend einerseits eine stabile Prototypenproduktion und bildet andererseits die Basis für eine iterative Korrektur und Optimierung in schnellen Zyklen mit jeweils geringem Änderungsumfang.

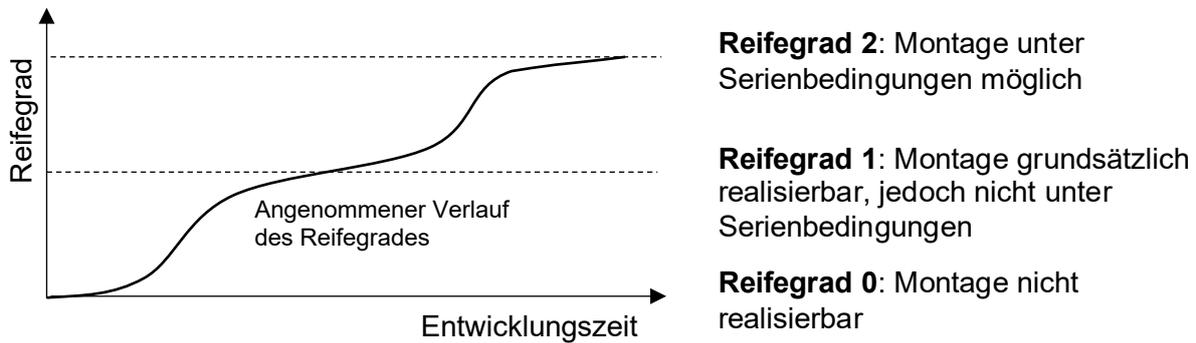


Abbildung 32: Modell diskreter Reifegradstufen i.A.a. [187]

Wie im letzten Abschnitt erläutert, stellt ein effizientes Problemmanagement die Grundlage für eine iterative Korrektur und Optimierung im Entwicklungsprozess dar. Der zweite Baustein der Methode befasst sich daher damit, die Erfassung, Charakterisierung, Dokumentation und Meldung von bei der Montage entdeckten Defiziten zu unterstützen, um den Problemlösungsprozess zu beschleunigen. Von Entwicklung oder Planung bereitgestellte Lösungsvorschläge sollen mithilfe des ersten Bausteins dann wiederum kurzfristig überprüft werden. Zunächst stehen dabei die Vollständigkeit und Korrektheit des Produktkonzepts sowie der Produkt- und Prozessdaten im Vordergrund. Konnten alle Umfänge so weit entwickelt werden, dass sie dem Reifegrad 1 entsprechen sollte die Montage der Prototypen weitgehend reibungslos verlaufen. Erfahrene Werker können jedoch häufig auch jenseits des ersten Reifegrades Defizite, Risiken oder Optimierungsmöglichkeiten erkennen, die sie proaktiv melden möchten. So können Produkt und Prozess auch nach Erreichung eines stabilen Montageablaufs weiter optimiert werden, bis ohne gezielte Prüfung keine Defizite mehr auffallen. In dem abgebildeten Modell wäre der Entwicklungsstand zu diesem Zeitpunkt zwischen Reifegrad 1 und 2 zu verorten.

Um sicherzustellen, dass die Entwicklungsergebnisse auch den angestrebten Reifegrad 2 erfüllen und die geplanten Montageabläufe geeignet für die Anwendung im Serienumfeld sind, müssen in einer dritten Phase anschließend auch weniger offensichtliche Defizite identifiziert und serienspezifische Anforderungen gezielt abgesichert werden. Dazu sollen mittels einer softwaregeführten Prozessbewertung tätigkeitsspezifische Aspekte und Eigenschaften explizit überprüft und bewertet werden. Diese Vorgehensweise bildet den dritten Baustein der Methode. Auf Basis der in Abschnitt 4.2 gesammelten Anforderungen soll dazu ein Katalog von Kriterien erstellt und eine Logik zur Bewertung dieser Kriterien durch Abfragen im Montageprozess entwickelt werden.

Im nächsten Kapitel werden, als Vorbereitung für die Entwicklung der Methodenbestandteile, zunächst einige Modelle für zentrale Elemente und Zusammenhänge der involvierten Domänen entworfen. Dazu zählen die Produktdaten, die Montagestrukturen und -prozesse, das Problemmanagement sowie die Reifegradbewertung. Anschließend folgt die Ausarbeitung der drei wesentlichen Methodenbestandteile. Im sechsten Kapitel wird das, die Methode unterstützende, technische System konzipiert und seine prototypische Implementierung beschrieben. Die Validierung der entwickelten Lösung im Rahmen einer Studie folgt im siebten Kapitel.

5 Ausarbeitung der Methode

Laut H. A. Simon besteht die Lösung eines Problems darin, es so zu repräsentieren, dass die Lösung offensichtlich wird [23, S. 132]. Die Modellierung erlaubt in jedem Fall ein besseres Verständnis der Domäne und stellt daher ein grundlegendes Element der Design-Theorie dar. Entsprechend werden im ersten Abschnitt dieses Kapitels zunächst einige Modelle für zentrale Themenkomplexe der Methode entwickelt. Wenngleich einige der Fragestellungen in vorhergehenden Kapiteln bereits angeschnitten wurden, sollen sie als Vorbereitung für die Ausarbeitung der Methodenbestandteile zunächst noch einmal vertieft werden. Anschließend werden für jeden der drei Bausteine die Anforderungen analysiert und Lösungen entwickelt.

5.1 Modellierung

Modelle reduzieren die Komplexität der realen Welt auf die für eine Fragestellung oder Anwendung relevanten Aspekte. Nur durch diese Reduktion wird eine reale Situation überschaubar und eine Lösung für eine bestimmte Zielsetzung implementierbar. So arbeiten beispielsweise Produktionsleitsysteme immer auf einem vereinfachten Modell der realen Fertigung [7, S. 31]. Meist steigt die Komplexität eines Modells deutlich je präziser es die Realität abbilden soll. Um eine ausreichende Realitätsnähe zu erreichen, dürfen jedoch auch keine wesentlichen Faktoren und Zusammenhänge vernachlässigt werden. In der Praxis stellt die Wahl der Modellierungstiefe durchaus eine Herausforderung dar, weswegen häufig mit einfachen Modellen begonnen und dann iterativ erweitert und verfeinert wird, bis eine für die geplante Anwendung ausreichende Präzision erreicht ist. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ebenso vorgegangen. Zunächst wurden einfache Modelle für die relevanten Themenbereiche entwickelt und anschließend kombiniert und iterativ erweitert.

Bei der Produktentwicklung wird ausgehend von einem Produktkonzept eine hierarchische Produktstruktur entworfen, die sukzessive detailliert und auskonstruiert wird (vgl. [188]). Beispielsweise lässt sich die Karosserie eines PKWs grob in den Vorderwagen, den Hinterwagen, das dazwischenliegende Bodenblech, die Seitenrahmen und das Dach sowie die Türen und Klappen unterteilen, wobei jedes dieser Module aus zahlreichen Baugruppen und Einzelteilen besteht. Zur Verwaltung der Struktur- und Entwicklungsdaten werden üblicherweise sogenannte Produktdatenmanagement-Systeme (PDM) eingesetzt, an die wiederum eine Materialstammdaten- und Zeichnungsdatenbank zur Speicherung des Bauteilkatalogs und der virtuellen Bauteilmodelle angebunden ist. Auf Basis der Produktstruktur, der Bauteilmodelle, der Bauteildaten (z.B. Material, Gewicht, etc.) und eines Modells der existierenden Montagestrukturen erfolgt während der Serienentwicklung die Montageprozessplanung. Aufbauend auf den Prozessen werden wiederum die projektspezifisch benötigten Betriebsmittel geplant. Diese drei Domänen und ihre wesentlichen Inhalte sind in **Abbildung 33** dargestellt. Im Folgenden werden, beginnend mit der Produktstruktur die wesentlichen Konzepte und Zusammenhänge dieser drei Domänen diskutiert und entsprechende Modelle vorgestellt. Die dabei verwendete Nomenklatur ist weder in der Praxis noch in der Literatur einheitlich, sondern meist unternehmensspezifisch bzw. durch die jeweils eingesetzte Software geprägt, die grundlegenden Konzepte ähneln sich jedoch sehr stark.

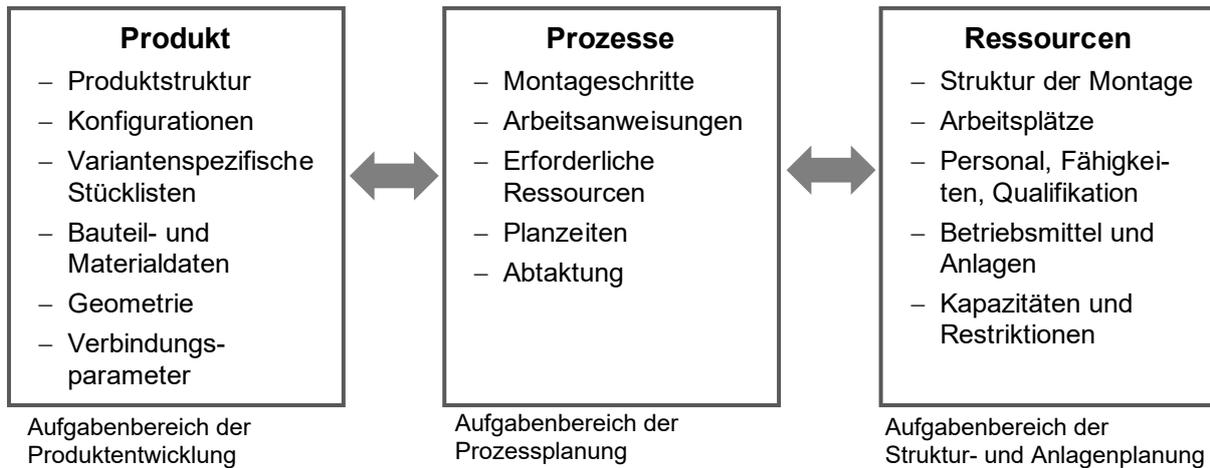


Abbildung 33: Die drei Modell-Domänen und ihre wesentlichen Inhalte (i.A.a. [7, S. 33])

Anschließend wird das Problemmanagement beleuchtet, da es bei der iterativen Entwicklung und Optimierung von Produkt und Prozessen eine zentrale Rolle spielt. Die Modellierung der Absicherungsprozesse und des Reifegradmanagements komplettieren diesen Abschnitt.

5.1.1 Produkt

Abbildung 34 illustriert die hierarchische Strukturierung eines Fahrzeugs beispielhaft und veranschaulicht die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Begriffe.

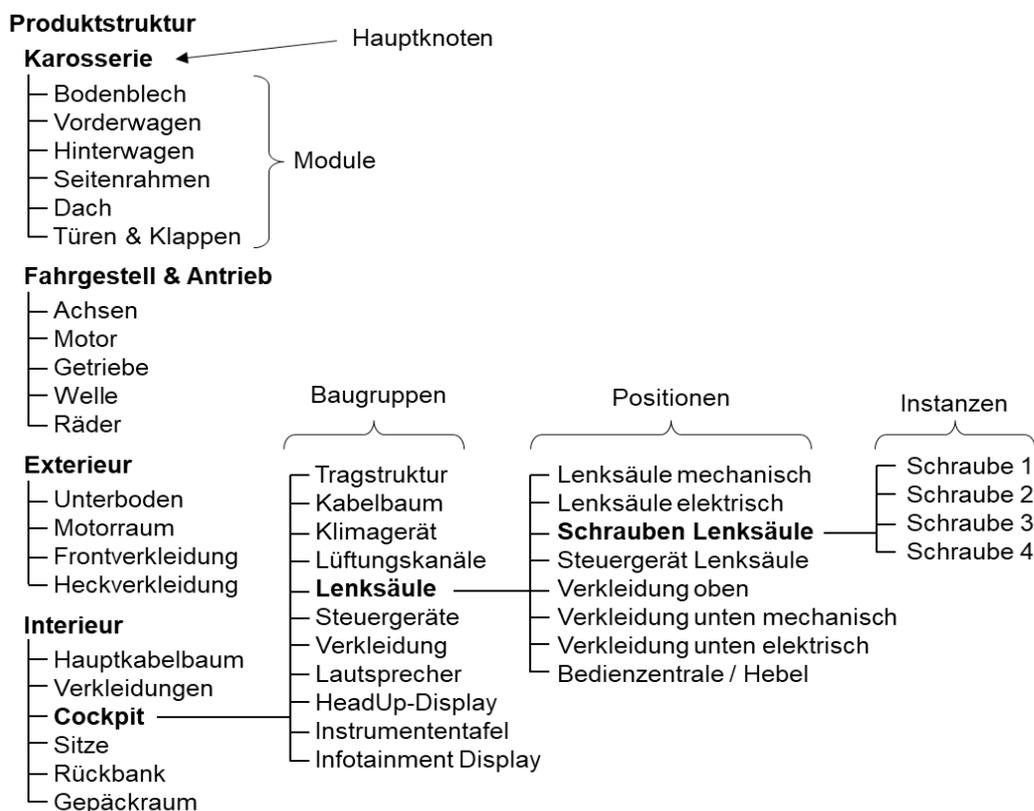


Abbildung 34: Beispiel für die hierarchische Strukturierung des Produkts

Die hier dargestellte hierarchische Produktstrukturierung kann prinzipiell auf verschiedenste Produkte angewendet werden und ist nicht auf den Automobilbau beschränkt. Ein komplexes mechatronisches Produkt kann auf verschiedenste Arten strukturiert werden, die Zuordnung einer Komponente zu einem bestimmten Knoten ist dabei nicht immer eindeutig. Entsprechend kann sich die Struktur selbst bei verschiedenen Modellen eines Herstellers deutlich unterscheiden. Aufgrund des Kontexts dieser Arbeit erfolgt die Diskussion am Beispiel eines typischen PKW. Ein PKW lässt sich grob in die Hauptknoten Karosserie, Fahrgestell und Antrieb, Exterieur und Interieur gliedern. Das zum Interieur gehörende Cockpit besteht aus mehreren Baugruppen, darunter die „Lenksäule“. Die Baugruppe „Lenksäule“ wiederum umfasst einige Positionen, die entsprechend der zu montierenden Variante benötigt werden oder nicht.

Abbildung 35 zeigt beispielhaft die Positionen der Baugruppe „Lenksäule“ bei einem BMW der 7er Reihe. Eine Position besteht aus einem oder mehreren gleichen Teilen die in einer Baugruppe einem bestimmten Zweck dienen. Aus Sicht der Endmontage kann die lackierte Karosserie, ebenso wie andere vormontierte Umfänge (z.B. das Klimagerät oder der Motor) wie ein Einzelteil betrachtet werden, auch wenn es sich eigentlich um einen Zusammenbau aus mehreren Einzelteilen handelt.

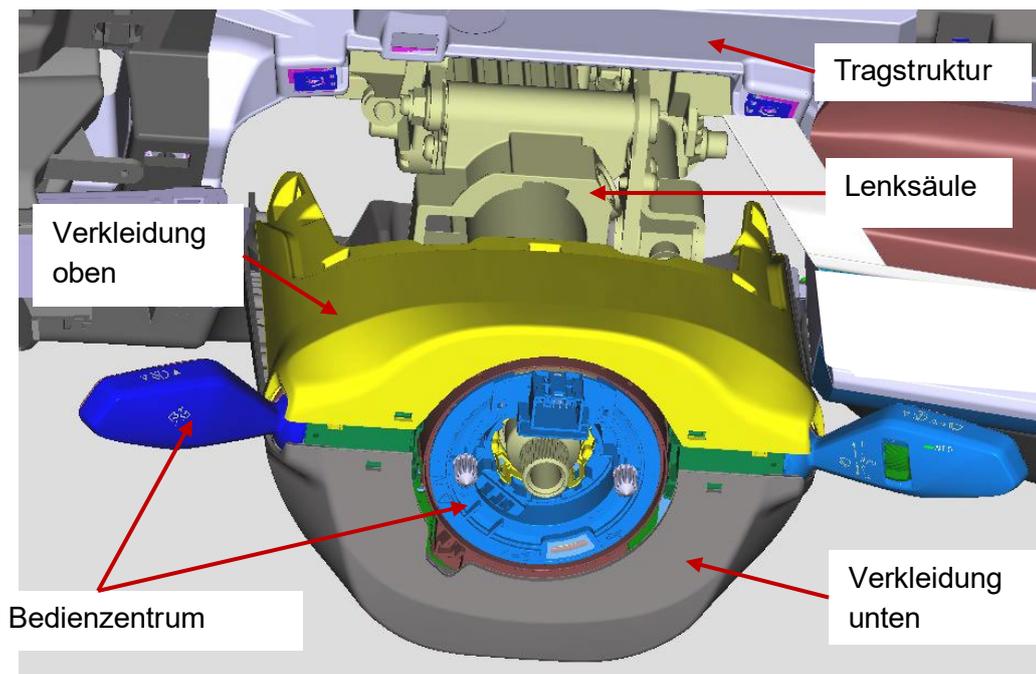


Abbildung 35: Positionen der Baugruppe Lenksäule im 3D Modell des 7er BMW
(Quelle: BMW Group 2018)

In diesem fiktiven Beispiel soll es zwei Varianten der Lenksäule geben, die Grundausstattung mit manueller Höhenverstellung und eine elektrische Verstellung als Sonderausstattung. Bei der elektrischen Variante muss auch ein Steuergerät sowie eine andere Verkleidung mit entsprechenden Bedienelementen verbaut werden. Die Lenksäule selbst ist zwar ein Zusammenbau aus vielen Einzelteilen, wird jedoch vormontiert geliefert und daher in der Montage wie ein Einzelteil behandelt. Die Schrauben zur Anbindung der Lenksäule an die Tragstruktur sowie die Lenksäulenverkleidungen oben stellen hingegen tatsächlich Einzelteile dar. Entsprechend

der Zahl an Komponenten einer Position umfasst diese wiederum eine oder mehrere Instanzen, welche die einzelnen Teile repräsentieren. Die Lenksäule wird mit vier Schrauben an der Tragstruktur verschraubt, entsprechend umfasst die Position „Schrauben Lenksäule“ vier Einzelteile, die durch vier Instanzen repräsentiert werden. Zu den an die Instanzen gekoppelten Informationen zählen die Lagekoordinaten, die die Position und Ausrichtung des jeweiligen Einzelteils (oder vormontierten Zusammenbaus) im Fahrzeugkoordinatensystem angeben.

Positionen ändern sich im Lebenszyklus auch nach dem Start der Serienproduktion durch Optimierungen oder Weiterentwicklungen und in verschiedenen Werken eines Herstellers werden möglicherweise unterschiedliche Komponenten verwendet. Um dies abzubilden, können zu einer Position mehrere Positionsvarianten (PV) mit entsprechender Werks- bzw. Liniengültigkeit und zeitlicher Gültigkeit gebildet werden. Bei variantenabhängigen Positionen muss eine Verwendung angegeben werden, also definiert werden, bei welcher Produktkonfiguration die jeweilige Position zu verbauen ist. Des Weiteren umfasst eine Positionsvariante Anzahl und Art der Teile (Menge und Materialnummer). Über die Materialnummer besteht eine Verknüpfung zur Materialstammdatenbank, die den Teilekatalog, Materialdaten und 3D Modelle umfasst. **Abbildung 36** stellt die Zusammenhänge dar.



Abbildung 36: Positionen, Positionsvarianten und Materialstammdaten

Aus der Produktstruktur können für einen bestimmten Auftrag unter Berücksichtigung der Fahrzeugkonfiguration (Verwendung der PV), des Bautermins (zeitliche Gültigkeit) und der Linie, auf der der Auftrag bearbeitet wird (Werks- bzw. Liniengültigkeit) sowie etwaiger Sonderumfänge (Spezialvarianten, beispielsweise für Erprobungs- oder Einsatzfahrzeuge) die erforderlichen Positionsvarianten ermittelt und zu einer auftragsspezifischen Stückliste (auch *Bill-of-materials* (BOM) genannt) reduziert werden (vgl. **Abbildung 37**). Dieser Prozess wird häufig als Stücklistenauflösung bezeichnet. Der Ablauf und die technische Umsetzung werden von Kropik in [7, 38-41] ausführlich beschrieben.

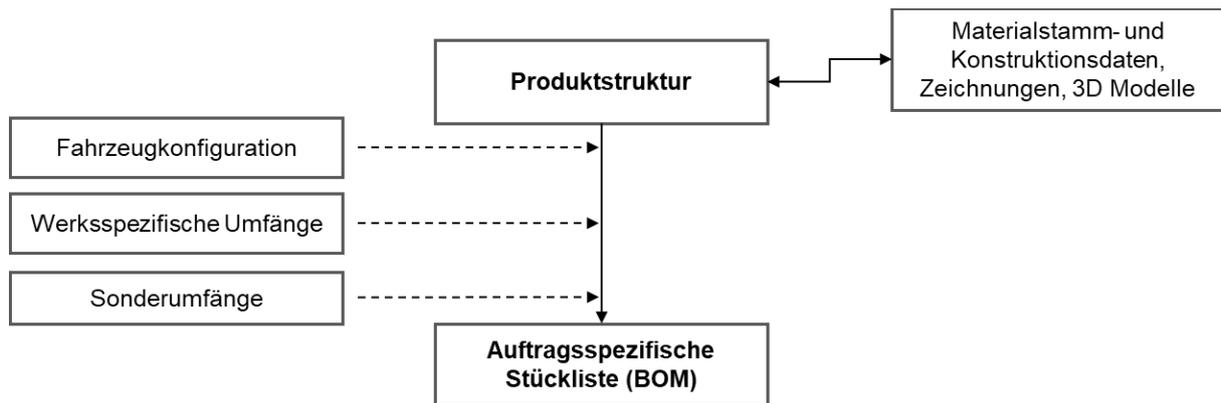


Abbildung 37: Auflösung der Produktstruktur zur auftragsspezifischen Stückliste

Der Prozess der Stücklistenauflösung diente in der Vergangenheit primär dazu, im Rahmen der Bedarfsrechnung eine Planungsgrundlage für die Logistik bereitzustellen und die Materialabrufe auszulösen. Daher konzentrieren sich existierende Implementierungen häufig auf die logistisch relevanten Informationen, reduzieren die Positionsdaten auf eine normalisierte Materialliste für ein gewisses Produktionsprogramm und reichern diese ggf. mit kaufmännischen Daten (z.B. Kosten und Lieferanten einer Komponente) an. Für die Volumenrechnung kann auf eine präzise, fahrzeuggenaue Auflösung häufig verzichtet werden, weshalb sie in älteren Systemen oftmals nicht möglich ist. Eine präzise, auftragsspezifische Liste der Positionsvarianten (und Instanzen) bildet jedoch die Voraussetzung für viele modernere Anwendungen, beispielsweise die vollständige Bauteilrückverfolgung oder Werkerinformationssysteme, die über eine einfache Variantenanzeige hinausgehen. Die vollständige Visualisierung eines Fahrzeugs im Montageprozess stellt einen weiteren Anwendungsfall dar. Da für jedes Bauteil ein 3D Modell hinterlegt ist und die Lageinformationen über die Instanzen verfügbar sind, müssen lediglich die erforderlichen Bauteilmodelle geladen, instanziiert und in die korrekte Lage transformiert werden. Modernere PDM- oder ERP-Systeme sind daher heute meist in der Lage die Informationen tatsächlich fahrzeuggenau bereitzustellen.

5.1.2 Montagestruktur

Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, erfolgt die Endmontage bei der Serienproduktion von PKW heute fast ausschließlich als Fließmontage auf mehr oder weniger starr verketteten Montagelinien (vgl. **Abbildung 9** auf Seite 18), große Werke verfügen teilweise über mehrere Linien. Auch die Montage lässt sich hierarchisch gliedern, wie in **Abbildung 38** dargestellt. Unterhalb eines Werks stellt die Montagelinie das oberste Strukturelement dar. Eine Linie ist in mehrere Bänder, Vormontagen und den End-of-Line Bereich unterteilt. Jedes Band umfasst wiederum viele Takte. In manchen Unternehmen wird mit dem Bandabschnitt eine weitere Gliederungsebene zwischen Band und Takt genutzt. Ein Takt entspricht einem Bereich des Bandes, in dem sich ein Fahrzeug bzw. ein Vormontageumfang beim Transport durch die Fördertechnik für die Dauer der Taktzeit befindet. Ist für umfangreiche Montagetätigkeiten mehr Zeit erforderlich, so können auch mehrere Takte zu einem Doppel- oder Mehrfachtakt zusammengelegt werden. Je Takt kann es einen oder mehrere Arbeitsplätze geben, auch Leertakte ohne manuelle Arbeitsinhalte sind möglich (Reserve oder reine Automatikstationen).

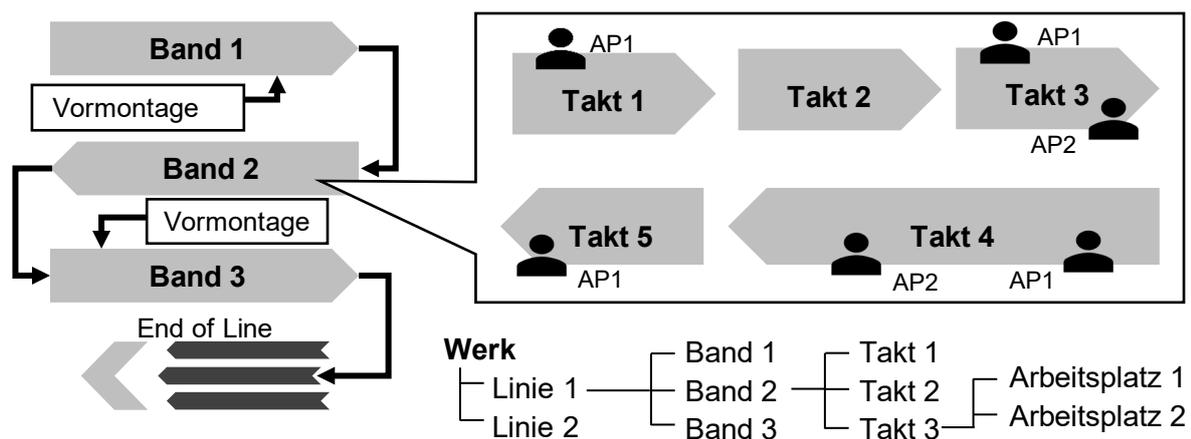


Abbildung 38: Hierarchische Gliederung der Fahrzeugmontage

Bei der Abtaktung werden alle Montagetätigkeiten so auf die Arbeitsplätze verteilt, dass sich eine möglichst gleichmäßige Auslastung ergibt. Während einfache, manuelle Montagearbeitsplätze bei der Umtaktung im Rahmen von Volumenänderungen oder der Integration neuer Varianten oder Modelle relativ flexibel entlang der Linie verschoben werden können, solange die Montagevorrangbeziehungen eingehalten werden, stellen größere Automatikstationen Fixpunkte dar, die sich nur mit sehr hohem Aufwand verlegen lassen. Auch räumliche Restriktionen beschränken die Freiheitsgrade bei der Abtaktung. Existierende Montagestrukturen müssen daher bei der Montageplanung von Anfang an berücksichtigt werden. Neue Linien werden aufgrund der hohen Investitionen meist nicht spezifisch für ein Modell ausgelegt, sondern nach den im jeweiligen Unternehmen etablierten Standards aufgebaut. Auch in diesen Fällen ist die Montageplanung daher nicht völlig frei, sondern an gewisse Vorgaben gebunden.

5.1.3 Montageprozesse

Die Vorgehensweisen und Werkzeuge der Montageplanung und dadurch auch die Planungsergebnisse variieren in verschiedenen Branchen und Unternehmen stark. Die in der Praxis anzutreffende Vielfalt reicht von einfachen, nicht standardisierten Arbeitsanweisungen, die mithilfe von Textverarbeitungs- oder Tabellenkalkulationsprogrammen erstellt werden, bis hin zu umfassenden digitalen Datensätzen, die durch spezialisierte Software generiert und verwaltet werden. Der Einsatz spezieller Planungs-Software erfordert zwar einen gewissen Initialaufwand, jedoch bieten derartige Lösungen einmal eingeführt viele Vorteile. So können beispielsweise Daten der Produktentwicklung automatisiert übernommen und angereichert, Tätigkeiten abgeleitet und deren Titel sowie textuelle Beschreibungen unter Nutzung eines standardisierten Vokabulars automatisch erzeugt werden. Der manuelle Aufwand für die Planung wird dadurch deutlich reduziert und der Prozess beschleunigt. Die Verknüpfung mit der Produktstruktur und den 3D Modellen der Komponenten ermöglicht die Visualisierung von Montageabläufen. Die Qualität der erzeugten Planungsdaten steigt, sie können durch standardisierte Formate besser weiterverarbeitet und beispielsweise in Software für die Abtaktung und Ablaufsimulation importiert werden. Die Wiederverwendung sowie die Verwaltung verschiedener Planstände werden erleichtert. In der Automobilbranche haben sich entsprechende Lösungen in den letzten Jahren stark verbreitet. In dieser Arbeit wird daher davon ausgegangen, dass

die Montageplanung strukturierte Datensätze erzeugt, die im Laufe der Serienentwicklung zunehmend vervollständigt und detailliert werden.

Die Montage eines Produkts kann als Abfolge vieler Montageschritte betrachtet werden. Jeder Montageschritt umfasst wiederum eine oder mehrere Tätigkeiten. Durch die Verteilung der Montageschritte auf die Arbeitsplätze entlang der Linie werden Arbeitspakete gebildet. **Abbildung 39** illustriert dies am Beispiel der Lenksäulenmontage. In der Serienmontage werden teilweise durch mehrere Werker gleichzeitig Arbeiten an einem Fahrzeug ausgeführt, dennoch kann der Montageprozess mit wenigen Ausnahmen (z.B. Kooperation mehrerer Werker bei einer Tätigkeit) als sequentielle Abfolge von Montageschritten betrachtet werden. In einem freien Montageumfeld lässt sich der Montagefortschritt bestimmen, indem der Anteil der abgeschlossenen Montageschritte (bzw. deren Planzeit) an der Gesamtzahl der für das Fahrzeug in seiner spezifischen Konfiguration erforderlichen Tätigkeiten (bzw. der gesamten Planzeit) betrachtet wird. Auf einer starr verketteten Linie ist die Durchlaufzeit hingegen meist unabhängig vom tatsächlichen Montageinhalt einer Variante.

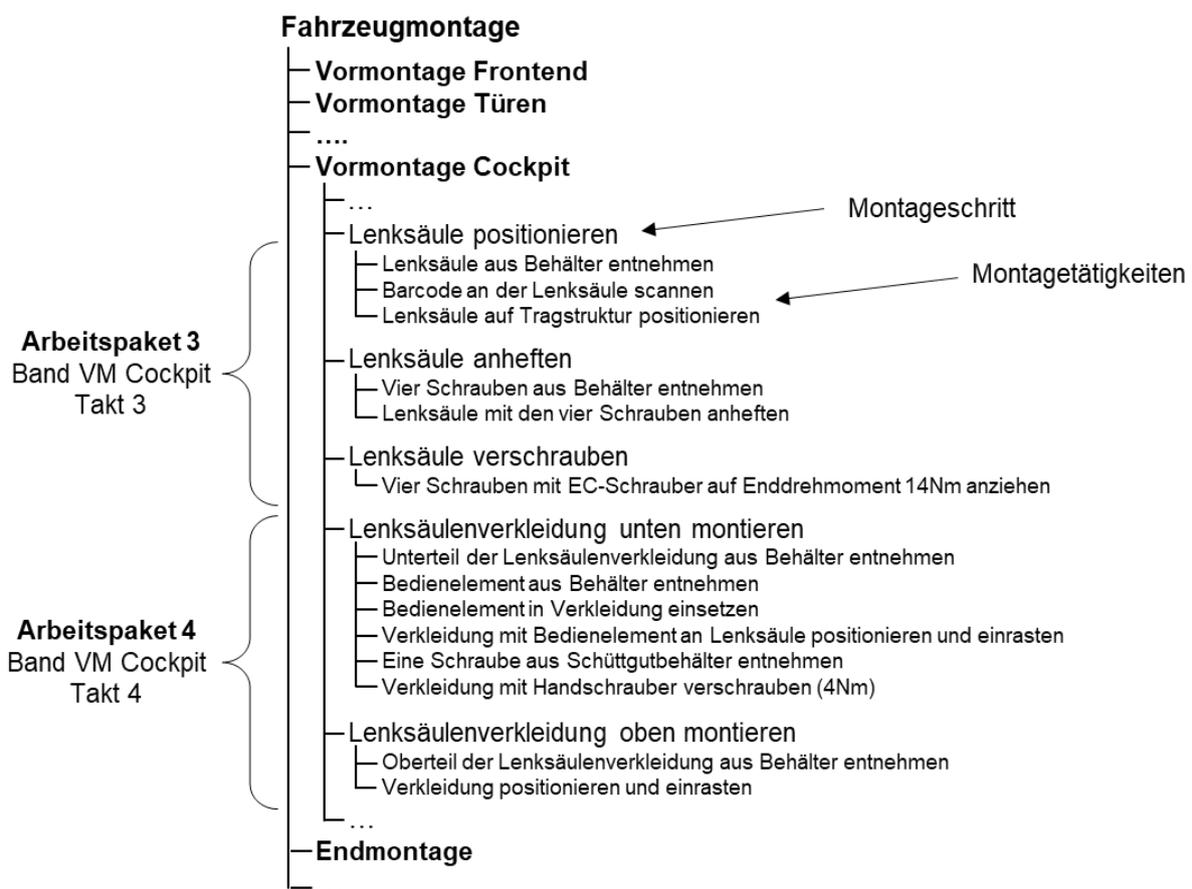


Abbildung 39: Strukturierung des Montageprozesses in Montageschritte, Tätigkeiten und Arbeitspakete am Beispiel der Lenksäule in der Cockpitvormontage

Ausgehend von der Produktstruktur beginnt die Montageplanung damit, die unmittelbar durch das Produkt bestimmten (konstruktiv bedingten) Arbeitsinhalte und prozessual erforderlichen Tätigkeiten (z.B. Prüfungen, Justagen) zu definieren und Montageschritte zu bilden (soweit

dies nicht bereits durch die Planungs-Software automatisiert erfolgt). Diese sind unabhängig von der spezifischen Gestalt einer bestimmten Linie für die Montage des Produkts erforderlich. Üblicherweise wird für jeden Arbeitsschritt eine Bezeichnung vergeben, eine textuelle Beschreibung der Arbeitsinhalte (Tätigkeiten) erstellt und die Planzeit abgeschätzt. Weitere Informationen wie Prozessparameter oder erforderliche Werkzeuge können auch bereits in dieser Phase definiert werden. Anschließend werden die Tätigkeiten unter Berücksichtigung der Montagevorrangbeziehungen und der Montagestruktur in eine grobe Reihenfolge gebracht. Aufgrund werks- und linienspezifischer Gegebenheiten und in Abhängigkeit der definierten Montagereihenfolge sind linienspezifische weitere Zusatztätigkeiten (z.B. Wege) erforderlich, die anschließend bei der Detailplanung und Abtaktung für jede Linie ausgeplant und iterativ optimiert werden müssen. Dabei werden auch die linien- und abtaktungsspezifischen Attribute der Kerntätigkeiten definiert.

Werden die linien- oder abtaktungsspezifischen Attribute bei der Planung der Montageschritte, wie in **Abbildung 40** dargestellt, in einen eigenen Datensatz ausgelagert, können die Kerntätigkeiten linien- und ggf. modell-übergreifend verwendet werden. Dies reduziert den Planungsaufwand, wenn ein Modell auf mehreren Linien oder ein Folgemodell geplant wird.

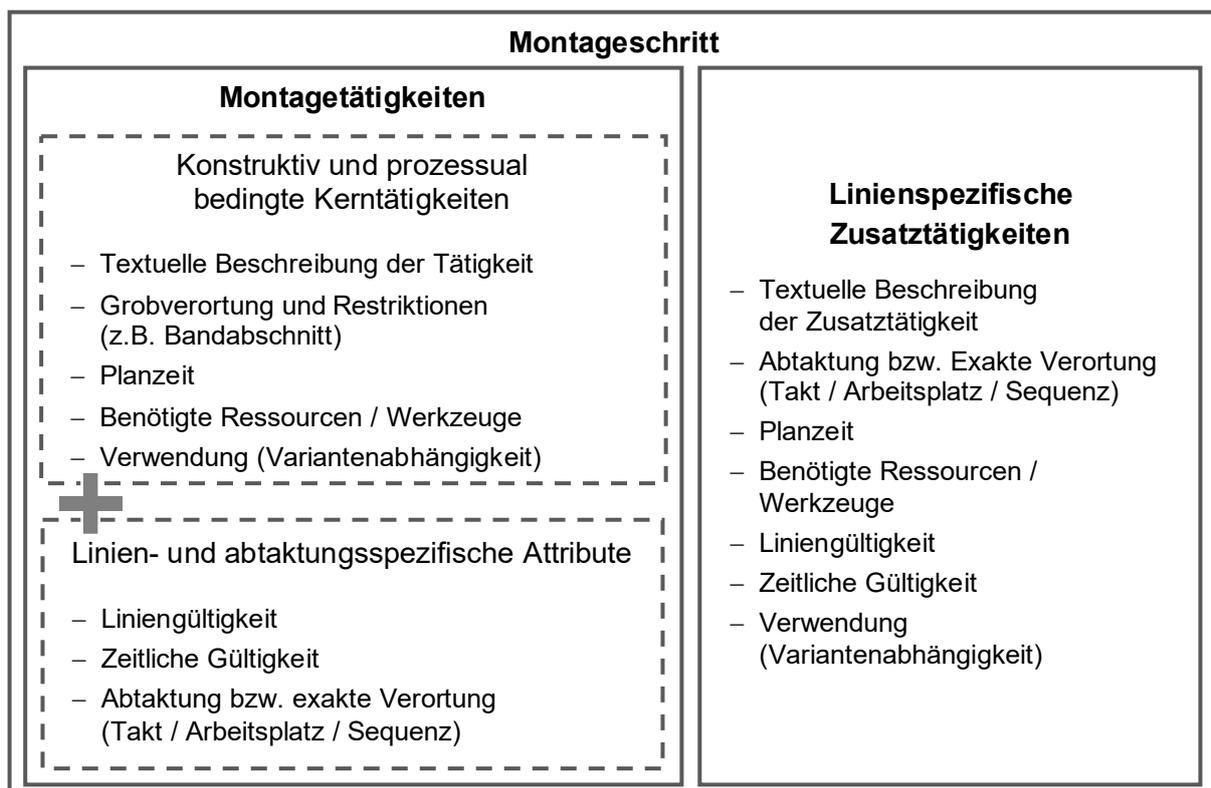


Abbildung 40: Modell für die Spezifikation von Montageschritten bei der Planung

Als Ergebnis der Montageplanung liegt eine vollständige Spezifikation aller Montageprozesse vor, die zur Produktion aller möglicher Varianten des Produkts erforderlich sind. Alle Tätigkeiten sind Montagearbeitsplätzen zugewiesen, durch eine Sequenznummer wird die Reihenfolge der Arbeitsinhalte an einem Arbeitsplatz festgelegt. Für einen Arbeitsplatz lassen sich somit für einen Planstand bzw. einen Baetermin (zeitliche Gültigkeit) alle potenziell

auszuführenden Montageschritte und Zusatz Tätigkeiten auflisten (Montageort bzw. Verortung und Liniengültigkeit). Ob ein Montageprozess bei einem bestimmten Fahrzeug tatsächlich auszuführen ist, hängt von der jeweiligen Produktvariante (Variantenabhängigkeit) ab. Die Summe der Planzeiten der je Fahrzeug potenziell relevanten Montageschritte eines Arbeitspakets sollte dabei unter Berücksichtigung des Modell- und Variantenmixes die Taktzeit im Mittel nicht überschreiten. Auch sollte bei der Programmplanung darauf geachtet werden, dass sich Fahrzeuge mit umfangreicherem und geringerem Arbeitsinhalt abwechseln, um eine Überlastung der Werker zu vermeiden.

5.1.4 Montagesituation

Ein Modell für den Ablauf eines Montageschritts in der manuellen Montage wurde bereits im Abschnitt 4.2.2 vorgestellt. Dieses Modell soll hier noch um den Kontext ergänzt werden, um die Montagesituation im Hinblick auf die situationsbezogene, bedarfsgerechte Informationsbereitstellung gesamthaft abzubilden. Laut Claeys et.al. besteht der primäre Kontext einer Montagesituation aus dem Menschen, Dingen (Montageobjekt, Material und Betriebsmittel), der Aufgabe und dem Arbeitsraum [137]. Ein entsprechendes Modell für eine Montagesituation ist in **Abbildung 41** dargestellt. Die Elemente werden im Folgenden diskutiert.

Mensch

Im Zentrum der manuellen Montage steht der Mensch mit seinen vielfältigen Charakteristika und Attributen, die die Ausführung und das Ergebnis einer Montageaufgabe maßgeblich beeinflussen. Angefangen mit der Physiognomie (insb. Statur und Kraft) sowie den motorischen Fähigkeiten, die die praktische Ausführung einer Tätigkeit ermöglichen (oder in ungünstigeren Fällen verhindern), über den tätigkeitsbezogenen Übungsgrad bis hin zu erlerntem Wissen, seiner Erfahrung und seiner mentalen Verfassung bestimmen die Eigenschaften des Werkers ob die Montage in der erforderlichen Güte unter den gegebenen Rahmenbedingungen gelingen kann. Hinsichtlich der Physiognomie des Menschen erfolgt die Auslegung eines Arbeitsplatzes meist für ein bestimmtes Perzentil. Die Anthropometrie liefert dazu die Information zur Verteilung bzw. Auftretenshäufigkeit bestimmter Körpermaße in bestimmten Personengruppen. Hinsichtlich der Montagekräfte und zulässiger Lasten bzw. Belastungen existieren zahlreiche Vorgaben und Normen aus dem Bereich der Arbeitsergonomie. Wenngleich diese Aspekte für die Gestaltung (inbs. Anzeige- und Bedienkonzept) und die resultierende Akzeptanz eines Assistenzsystems durchaus relevant sind, werden sie hier zunächst nicht weiter betrachtet, da sie für die Methode selbst von untergeordneter Bedeutung sind. Das im Vorfeld der Montage erlernte Wissen bzw. die Erfahrung des Werkers sind im Kontext der Methode hingegen relevanter, da sie den Informationsbedarf bestimmen. Auch die Qualifikation des Werkers scheint interessant, da basierend auf diesen Informationen beispielsweise geprüft werden könnte, ob ein Mitarbeiter eine gewisse Tätigkeit durchführen darf (z.B. sicherheitskritische Arbeiten am Hochvolt-System eines Elektrofahrzeugs). Der Übungsgrad des Werkers beeinflusst je nach Art der Tätigkeit stärker oder schwächer und in gewissen Grenzen die Montagegeschwindigkeit. Letztlich stellt auch die mentale Verfassung eines Werkers, insbesondere seine Motivation, einen wichtigen Faktor für die Montageleistung dar. Durch die Reduzierung monotoner Tätigkeiten oder Ansätze aus dem Bereich der Gamification können Assistenzsysteme hierbei positiv wirken.

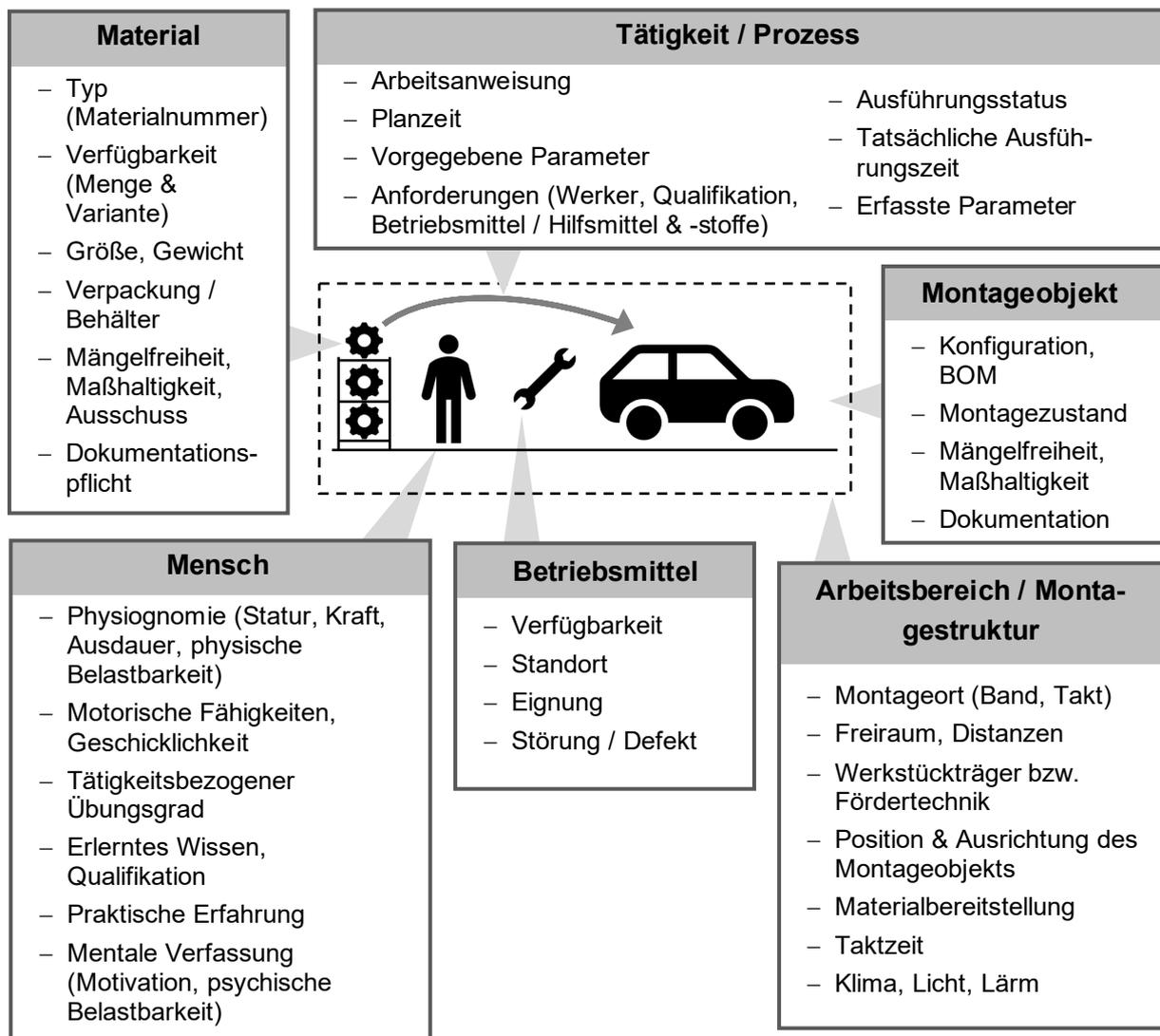


Abbildung 41: Modell einer manuellen Montagesituation

Um die Assistenzfunktionen auf den jeweiligen Anwender anzupassen, könnten einige der genannten Faktoren, beispielsweise die Qualifikation, im Profil der Werker hinterlegt (oder aus vorhandenen Informationssystemen übernommen) werden. Andere Aspekte könnte ein solches System selbst erfassen, beispielsweise den Übungsgrad (Anzahl der durchgeführten Wiederholungen eines Arbeitsschritts).

Montageobjekt

Neben dem Menschen spielt das zu montierende Produkt eine zentrale Rolle. Seine Konfiguration bestimmt das benötigte Material und die erforderlichen Montagetätigkeiten. Während in der Serie nahezu immer von einer vollständigen, konsistenten Konfiguration ausgegangen werden kann, muss im Prototypenbau mit fehlerhaften Konfigurationen gerechnet werden. Ähnlich verhält es sich mit der geometrischen Konsistenz und der Montierbarkeit. Wenngleich die Maßhaltigkeit bei Serienteilen deutlich höher ist als in der Vorserie, führen Toleranzinflüsse auch in der Serienmontage häufiger zu Problemen. Aus dem Montagezustand lässt sich ableiten, welcher Arbeitsschritt als nächstes auszuführen ist.

Die Mängelfreiheit bzw. Maßhaltigkeit des bisherigen Aufbaus bestimmt dabei, ob die Montage wie geplant fortgesetzt werden kann, oder ob zunächst im Rahmen der Nacharbeit Fehler korrigiert oder Teile getauscht werden müssen. Schließlich sind Prozessdaten (beispielsweise Drehmomentverläufe bei sicherheitskritischen Verschraubungen) und die verwendeten Komponenten (bzw. deren Seriennummern) in der (digitalen) Fahrzeugakte zu dokumentieren.

Arbeitsbereich

Werker und Montageobjekt befinden sich im Arbeitsbereich, in der Serie meist einem Takt einer Haupt- oder Vormontagelinie. Das Fahrzeug bzw. Montageobjekt wird durch die Förder-technik oder den Werkstückträger in einer bestimmten Ausrichtung getragen und bleibt stationär oder bewegt sich durch den Arbeitsraum. Die Taktzeit ggf. abzüglich der Dauer für das Ein- und Ausfahren gibt die, für die Montage- und Zusatz Tätigkeiten verfügbare Zeit vor. Das Layout des Bereichs mit der Bereitstellung von Material und Betriebsmitteln sowie der Position und Ausrichtung des Montageobjekts (bzw. dem Verlauf dieser) bestimmt die vom Werker zurückzulegenden Strecken und ergonomische Aspekte wie die Körperhaltung oder die Einsehbarkeit der Montagestelle. Insbesondere für die Montage großer, sperriger Komponenten ist entsprechender Freiraum erforderlich, um Kollisionen und Beschädigungen zu vermeiden. Auch für die Anstellung des Materials ist Raum erforderlich, was insbesondere bei Takten mit hoher Varianz, MMALs oder Brown-Field Werken mit begrenztem Platzangebot zu Herausforderungen führen kann. Letztlich wirken sich Umgebungsfaktoren wie Klima, Beleuchtung oder Lärm auf den Werker, sein Wohlbefinden und seine Montageleistung aus.

Material

Die zu montierenden Komponenten werden entweder sortenrein oder auftragsspezifisch vorkommissioniert im Arbeitsbereich bereitgestellt, wobei letzteres Verfahren häufig bei hoher Varianz (z.B. Farb- oder Dekor-Varianten im Interieur) oder begrenzter Anstellfläche zum Einsatz kommt. Aus Sicht des Werkers muss das richtige Material in ausreichender Menge und Qualität (Mängelfreiheit, Maßhaltigkeit) vorhanden sein, damit er seine Montageaufgabe wie vorgegeben ausführen kann. Zudem ist für ihn relevant, ob eine Komponente beispielsweise durch Scannen eines Strichcodes für die Dokumentation erfasst werden muss. Das für die Erfassung genutzte Merkmal kann sich am Bauteil selbst oder auch am Behälter bzw. der Verpackung befinden. Je nach erforderlicher Menge, Größe, Gewicht und Empfindlichkeit werden die Komponenten verpackt oder unverpackt in Schüttgutbehältern, Gitterboxen, Regalen oder Gestellen angeliefert. Besonders große und sperrige Komponenten wie Reifen können auch durch automatische Regalsysteme oder eigene Fördertechnik zugeführt werden. Eine Verpackung schützt empfindliche Teile und Oberflächen vor Beschädigung bei Transport und Montage, verursacht jedoch zusätzlichen Aufwand für das Auspacken und die Entsorgung des Verpackungsmaterials. Eine Verwechslungsgefahr wird idealerweise konstruktiv oder prozessual vermieden. Ist dies nicht gänzlich möglich, so muss dem Werker signalisiert werden, welche Komponente beim aktuellen Fahrzeug zu verwenden ist. Dies kann über eine Variantenanzeige, ein Assistenzsystem oder eine Anzeige bzw. Kennzeichnung am Behälter erfolgen. Auch der Umgang mit Ausschuss und defekten Teilen muss klar definiert sein, um einen erneuten Verbau dieser Komponenten zu vermeiden. Um Verletzungen und Beschädigungen vorzubeugen, werden an empfindlichen oder scharfkantigen Stellen des Fahrzeugs zu Beginn der Montage Verkleidungen (beispielsweise Matten an den Einstiegsleisten oder

Schaumstoffpolster an den Kanten) angebracht. Diese Komponenten werden teilweise im weiteren Verlauf der Montage wieder entfernt, als Umlaufteil wiederverwendet oder entsorgt.

Betriebsmittel

Zur Montage erforderliche Betriebsmittel müssen im Arbeitsbereich an einer definierten Position vorhanden, für den Prozess und die Rahmenbedingungen geeignet und einsatzbereit sein. Entsprechend muss für eine regelmäßige Wartung oder Ersatz gesorgt sein. Neben einfachen manuellen Handwerkzeugen werden in der Fahrzeugmontage zunehmend digitale Werkzeuge wie intelligente Schraubsysteme eingesetzt, die sich beispielsweise automatisch auf die jeweils zu verwendenden Parameter einstellen, ihre Position sowie die vollständige und korrekte Ausführung der Tätigkeit prüfen und Prozessdaten aufzeichnen. Für bestimmte Tätigkeiten sind spezielle Prüf- und Messmittel erforderlich, teilweise werden auch spezielle Anlagen für Justageprozesse eingesetzt. Während Automatikstationen und manuelle Arbeitsplätze bis vor einigen Jahren aus Sicherheitsgründen strikt getrennt wurden, sind durch Innovationen im Bereich der sensitiven Robotik zunehmend auch hybride Arbeitsstationen anzutreffen, in denen Mensch und Roboter ohne trennende Schutzzäune kollaborieren. Neben solchen neuartigen Konzepten kommen zur Erleichterung einer korrekten Montage nach wie vor einfache Montagehilfsmittel (auch Sonderbetriebsmittel genannt) wie Lehren, Positionierungshilfen bzw. Schablonen oder Fädelhilfen für Leitungen zum Einsatz. Zur Verbesserung der Ergonomie können Sitze und Stehhilfen oder rollbare Material- und Werkzeugwagen genutzt werden. Schließlich erfordern gewisse Prozesse Montagehilfsstoffe wie Schmier- oder Reinigungsmittel, die entsprechend des Verbrauchs laufend nachgeliefert werden müssen. Um Schäden an den Fahrzeugen wie auch den Werkzeugen selbst vorzubeugen, werden Werkzeuge häufig mit Verkleidungen aus weichen Kunststoffen ausgestattet.

Prozess

Der Montageprozess kann als Zustandsänderung des Montageobjekts betrachtet werden, wie in **Abbildung 42** illustriert.

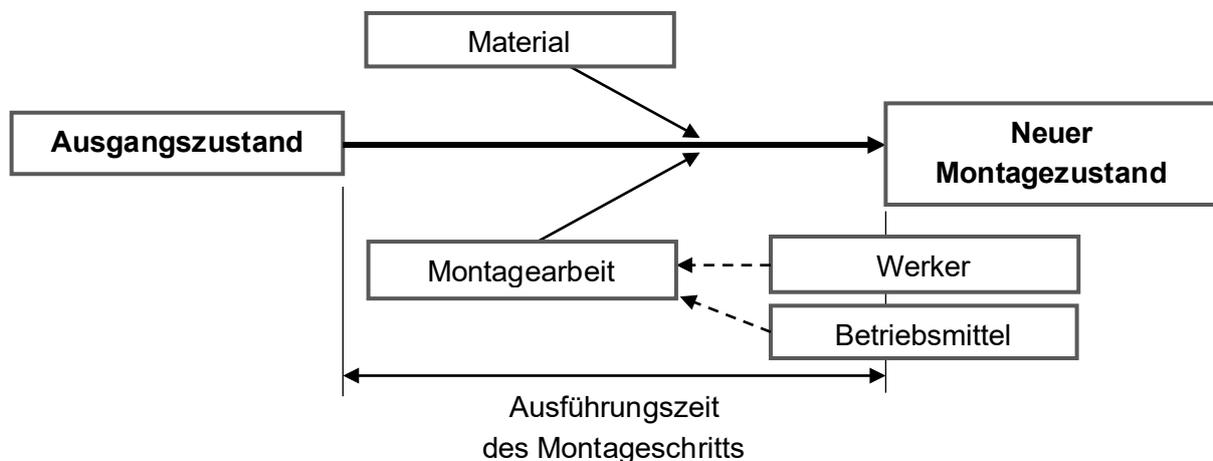


Abbildung 42: Modellierung eines Montageprozesses als Zustandsänderung des Montageobjekts

Der Werker verrichtet mithilfe der Betriebsmittel Montagearbeit, wobei er ggf. Material in Form zusätzlicher Komponenten in das Montageobjekt einbringt. Die Zeitspanne von Beginn der

Tätigkeit bis zur Erreichung des Zielzustands entspricht der tatsächlichen Ausführungszeit des Montageschritts. Der Ablauf eines Montageschritts wurde im Abschnitt 4.2.2 bereits ausführlich diskutiert und modelliert.

Da die Planungsdaten bestimmen, welche Materialien und Betriebsmittel von Logistik und Arbeitsvorbereitung im Arbeitsbereich bereitgestellt werden und wie viel Zeit dem Werker für die Ausführung zur Verfügung steht, müssen diese Daten bereits im Vorfeld der Montage vorliegen. Unmittelbar vor der Durchführung der Montageaufgabe muss der Werker zunächst die Arbeitsanweisung erfassen, sofern ihm nicht durch entsprechende Qualifikation bereits bekannt ist, welche Tätigkeiten er auszuführen hat. Anschließend führt er die vorgegebenen Tätigkeiten aus. Um den Status der Montage zu erfassen setzen Assistenzsysteme häufig auf eine manuelle Quittierung, durch die der Werker nach einem Arbeitsschritt bestätigt, dass er die Aufgaben erledigt hat. Dies erzeugt jedoch zusätzlichen Aufwand und trägt nicht zur Akzeptanz solcher Systeme bei. Zudem ist nicht sichergestellt, dass die Tätigkeiten tatsächlich korrekt ausgeführt wurden. Daher werden vielfältige Sensorik-Systeme zur Erfassung und Kontrolle des Montagegeschehens erprobt. Die manuelle Quittierung kann beispielsweise durch eine Bauteilerfassung und digitale Betriebsmittel teilweise ersetzt bzw. um zusätzliche Prüfungen erweitert werden. Komplexere Systeme setzen zunehmend Bildverarbeitungsalgorithmen ein, um auch Bewegungen und Positionen bzw. den Montagezustand zu erkennen.

Die Ausführung eines Montageschritts kann, wie in **Abbildung 43** illustriert, zu vier Ergebnissen führen. Wurde die Montageaufgabe ohne Probleme wie vorgegeben ausgeführt, ist das Ergebnis in Ordnung und die Montage kann mit dem nächsten Montageschritt fortgesetzt werden. War ein, über den geplanten Umfang hinausgehender Aufwand erforderlich, um den Zielzustand zu erreichen (beispielsweise wurden mehrere Versuche benötigt, um eine Komponente korrekt zu positionieren oder ein bereits bestehender Mangel bzw. unbemerkter Fehler aus einer vorangehenden Station musste zunächst korrigiert werden), ist das Ergebnis ebenfalls in Ordnung (i.O.) und die Montage kann fortgesetzt werden. Allerdings sollte insbesondere bei häufigerem Auftreten geprüft werden, ob Produkt oder der Prozess verbessert werden können, um diesen erhöhten Aufwand zu vermeiden. Ggf. ist auch ein zusätzliches Training der Werker oder schlicht mehr Übung erforderlich. Selbiges gilt für den Fall, dass die Montageaufgabe mit geringfügigen, (für den geplanten Verwendungszweck) noch akzeptablen Mängeln erledigt wurde. Weist das Montageobjekt hingegen inakzeptable Mängel auf oder konnte die Montageaufgabe nicht durchgeführt werden, so ist das Montageergebnis nicht in Ordnung (n.i.O.). Meist wird in diesen Fällen direkt versucht das Problem noch im Arbeitsbereich zu beheben (Inline Nacharbeit), ggf. mit Unterstützung durch weitere Werker. Ist dies nicht möglich oder gelingt die Nacharbeit nicht in angemessener Zeit, so muss entschieden werden, ob die reguläre Montage trotz des n.i.O. Ergebnisses fortgesetzt und der Mangel später durch offline Nacharbeit behoben oder die betroffene Einheit sofort aus dem Montageprozess ausgeschleust wird. Treten n.i.O. Ergebnisse gehäuft auf, sollte ebenfalls eine Ursachenanalyse durchgeführt werden, um Gegenmaßnahmen ergreifen zu können. Im Umfeld des Prototypenbaus und der Vorserie sollten auch geringfügige Defizite im Rahmen des Problemmanagements stets dokumentiert und analysiert werden, um sie frühzeitig abzustellen und Probleme in der späteren Serienmontage vermeiden zu können.

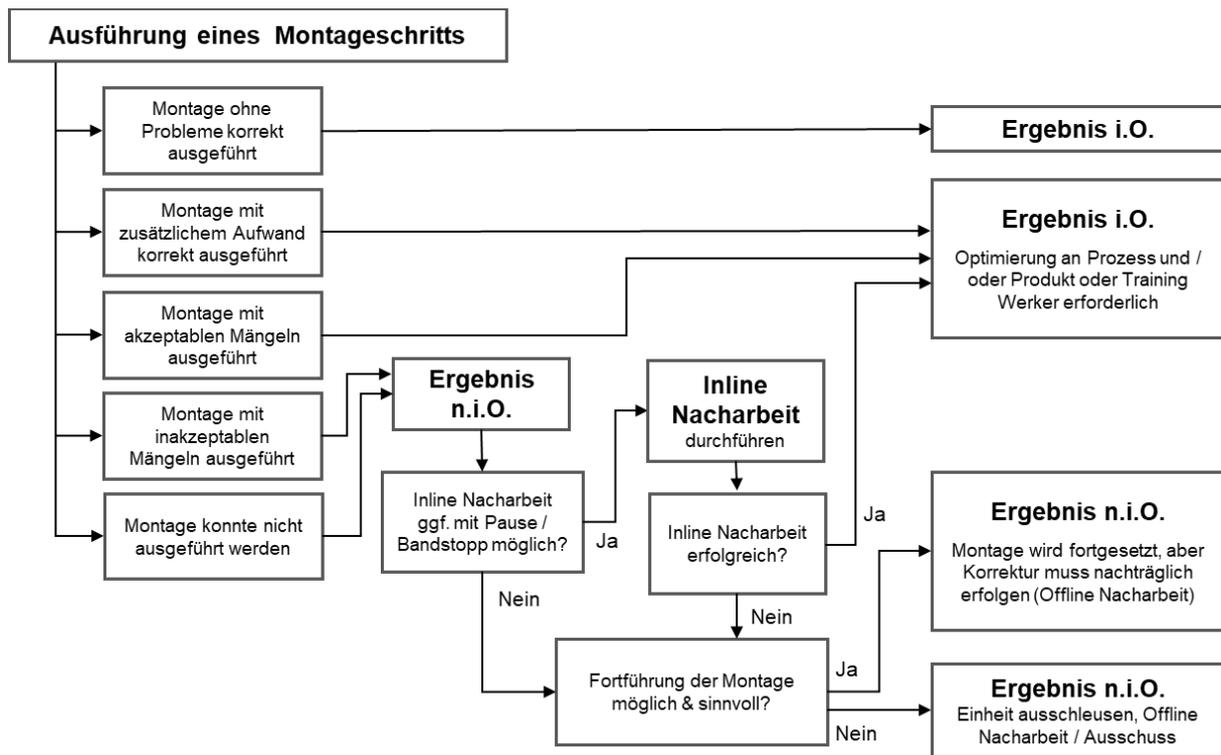


Abbildung 43: Mögliche Ergebnisse eines Montageschritts

5.1.5 Problemmanagement

Werden Defizite bei der Montage von Prototypen nicht erkannt oder als vermeintlich bedeutungslos ignoriert, entsteht ein Risiko für das Fahrzeugentwicklungsprojekt. Unzulänglichkeiten im Produkt (in Form jeglicher Abweichung vom geplanten Soll-Zustand) können bei der späteren Verwendung zu negativen Auswirkungen führen. Bei der Erprobung mit Prototypen können sie sich negativ auf die Validität der Ergebnisse auswirken, die Wiederholung von Versuchen erforderlich machen und die Entwicklung verzögern. Im ungünstigsten Fall verhindern sie die Entdeckung von Defiziten im Produktkonzept, wodurch potenziell später im Entwicklungsprozess aufwändige Änderungen oder, falls die Defizite erst während der Serienproduktion oder beim Endkunden zu Tage treten, sogar Rückrufaktionen erforderlich werden könnten.

Weicht der Werker bei der Prototypenmontage aufgrund von Defiziten im vorgesehenen Montageprozess von diesem ab, ohne dies zu dokumentieren, zu melden und dadurch eine Korrektur zu veranlassen, besteht das Risiko darin, dass die geplanten Prozesse später beim Hochlauf im Serienwerk nicht funktionieren. Da eine Abweichung jedoch aufgrund der Umgebungsbedingungen nicht mehr einfach möglich ist, können die geplanten Stückzahlen in diesem Fall nicht oder nur mit zusätzlichem Aufwand erreicht werden.

Um die Entwicklungsrisiken zu minimieren und eine zügige Steigerung der Reife zu erreichen, ist es daher zweckmäßig, dass die Werker jegliche Probleme oder Defizite umgehend dokumentieren und melden, damit diese im Rahmen des Problemmanagements gelöst oder zumindest als bekanntes Risiko getragen werden können.

Der zentrale Prozess des Problemmanagements ist in **Abbildung 44** dargestellt. Die Ursache eines Problems kann in unmittelbarer zeitlicher Nähe zu seinem Auftreten liegen, beispielsweise bei einem Montagefehler in einem vorhergehenden Montageschritt oder einem Fehler der Logistik. Sie kann aber auch deutlich weiter zurückliegen, wenn es sich um einen Konstruktions- oder Planungsfehler handelt. Der Werker kann zunächst lediglich das Fehlerbild erfassen und in Form einer Meldung dokumentieren. Wie bei der Analyse der Praxisdefizite in Kapitel 3 festgestellt, bildet der Aufwand für die Erstellung einer Problemmeldung eine Hemmschwelle und führt häufig dazu, dass Probleme nicht adäquat behandelt werden.

Nach der Erfassung muss die Meldung an einen Lösungsverantwortlichen adressiert werden. Im Wesentlichen stellen die Fachbereiche der Entwicklung, Konstruktion, Planung, Arbeitsvorbereitung oder Logistik dabei die potenziellen Empfänger dar. In der Praxis stellt die Identifikation des richtigen Ansprechpartners häufig eine Herausforderung dar, teilweise existieren mehrere Meldewege und Prozesse. Der Empfänger muss das Problem zunächst verstehen, um beurteilen zu können, ob er tatsächlich für die Lösung zuständig ist oder ob die Meldung an eine andere Stelle weitergeleitet werden muss. Die Qualität und Vollständigkeit einer Meldung ist dabei essenziell für das Problemverständnis. Gegebenenfalls sind bereits in dieser Phase Rückfragen oder weitere Analysen zur Problemursache erforderlich. Eventuell ist auch die Zusammenarbeit mehrerer Abteilungen erforderlich, da Probleme häufig ebenso prozessual wie konstruktiv gelöst werden können und beide Optionen unter gewissen Umständen Vor- und Nachteile bieten.

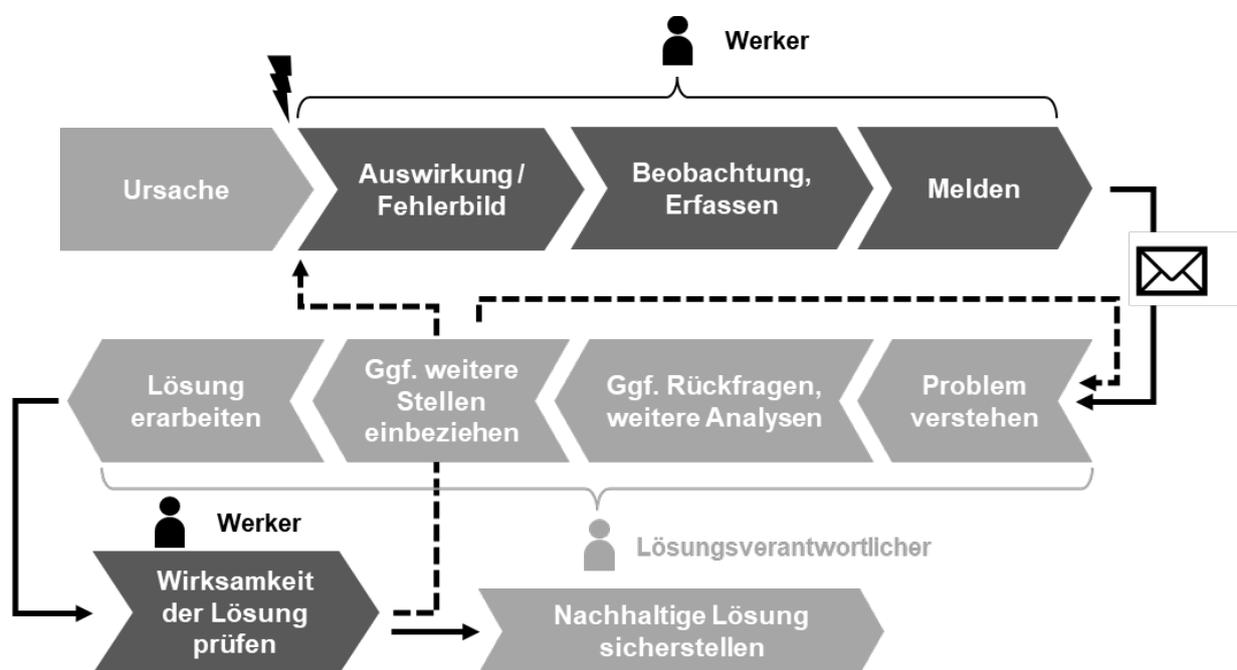


Abbildung 44: Modell des Problemmanagement-Prozesses (PMP)

Erst wenn eine Stelle die Problemmeldung akzeptiert und anerkennt, dass die Behebung in ihre Verantwortung fällt, beginnt der eigentliche Lösungsprozess. Auch in diesem können wiederum Rückfragen, Analysen oder Versuche erforderlich werden, um die exakte Problemursache zu identifizieren oder Wechselwirkungen nachzuvollziehen. Liegt schließlich ein Lösungs-

vorschlag vor, muss dessen Wirksamkeit durch Anwendung in der Montage geprüft werden. Treten dabei erneut Probleme auf, muss der Prozess iterativ durchlaufen werden, bis eine zufriedenstellende Lösung erreicht wurde. Abschließend empfiehlt es sich, die Lösung beispielsweise in Form von Konstruktions- oder Betriebsmittelvorschriften nachhaltig zu verankern, um einem erneuten Auftreten des Problems vorzubeugen.

Tritt bei der Montage ein Problem auf, ist insbesondere im Prototypenbau die Ursache nicht immer unmittelbar erkennbar. Der Werker stellt zunächst lediglich die Auswirkungen des Problems, das Fehlerbild fest. Für ihn ist dabei primär relevant, ob er die Montage (ggf. mit Zusatzaufwand bzw. Nacharbeit) fortsetzen kann, ob er auf die Lieferung von Ersatzteilen warten muss oder ob eine erfolgreiche Montage (im Sinne eines akzeptablen Resultats für den vorgesehen Verwendungszweck) mit den verfügbaren Mitteln gänzlich unmöglich ist.

Aus Sicht der Serienentwicklung bestimmt hingegen weniger die Auswirkung als die Ursache maßgeblich die Kritikalität eines Problems. Fehlt dem Werker beispielsweise eine Komponente, weil der Logistik bei der Kommissionierung ein Fehler unterlaufen ist, kann dies für den Werker bzw. die Produktion ein gravierendes operatives Problem darstellen und die termingerechte Montage gefährden, während aus Sicht der Entwicklung kein unmittelbarer Handlungsbedarf besteht (sofern der Zeitplan der Erprobungen nicht gefährdet ist). Fehlt die Komponente jedoch auf Grund eines Fehlers in der Produktstruktur bzw. der Stückliste ist die Tragweite des Problems möglicherweise deutlich größer und eine zeitnahe Korrektur dringend erforderlich, um weitere Auswirkungen (beispielsweise durch die Anpassung von Werkzeugen oder die Änderung von Zukaufteilen) zu vermeiden oder zumindest zu reduzieren.

Sowohl bei operativen wie auch bei konzeptionellen Problemen hängt die Zuständigkeit für die Lösung primär von der Problemursache ab. Eine möglichst frühzeitige Ursachenanalyse ist daher einerseits für eine nachhaltige Lösung operativer Probleme erforderlich. Andererseits hilft sie bei konzeptionellen Defiziten, Problemmeldungen zu priorisieren und direkt an den richtigen Ansprechpartner zu adressieren.

Effizienz und Effektivität des Problemmanagements hängen maßgeblich von dem Aufwand für eine Meldung sowie der Qualität und Vollständigkeit dieser ab. Während ein geringer Aufwand die Bereitschaft der Werker zur Erstellung einer Meldung steigert, ermöglicht eine umfassende Meldung ein besseres Problemverständnis beim Empfänger, minimiert Rückfragen und steigert die Qualität der Lösungsvorschläge. Um die Dauer von Meldung eines Defizits bis zur Behebung zu minimieren, ist eine direkte Adressierung an den richtigen Ansprechpartner, eine effiziente Kommunikation und eine schnelle Evaluierung der Lösungsvorschläge anzustreben. Durch qualitativ hochwertige Lösungsvorschläge, die die Problemursache nachhaltig beheben, lassen sich mehrfache Iterationen vermeiden. Schließlich ist es zur Steigerung der Entwicklungsleistung einer Organisation wichtig die Lösungen nachhaltig zu verankern, um vergleichbare Fehler bei künftigen Projekten zu vermeiden.

Ein System, das den PMP unterstützt, sollte jederzeit Transparenz zu Anzahl, Art und Status der offenen Probleme bieten. So können einerseits die Melder den Status der von Ihnen gemeldeten Themen prüfen, andererseits kann das Projektmanagement so den Entwicklungsstand besser bewerten und fundierte Entscheidungen treffen.

5.1.6 Absicherung und Reifegradbewertung

Bei der Diskussion des Reifegradmodells im Abschnitt 4.1 wurde bereits erläutert, dass sich die Messung des Reifegrades in der Praxis sehr schwierig gestaltet. Ungeachtet dieser praktischen Herausforderungen soll hier zunächst ein Modell entwickelt werden, das die Bewertung von Montageprozessen und die Testabdeckung bei der Absicherung möglichst vollständig beschreibt (nicht nur im Rahmen des Prototypenbaus, sondern der gesamten Serienentwicklung einschließlich der virtuellen Absicherung) und zusammen mit den Bewertungsergebnissen eine systematische Reifegradbestimmung ermöglicht. Dabei erfolgt zunächst lediglich eine Beschreibung der Zusammenhänge, Problemstellungen und Optionen, ohne jedoch auf eine konkrete Lösung einzugehen. Bei der Ausarbeitung des Lösungsansatzes im Abschnitt 5.4 wird dann diskutiert, wie die Absicherung so gestaltet werden kann, dass der Aufwand bei der praktischen Anwendung minimiert und die Aussagekraft der Reifegradbewertung maximiert wird.

Da bei der Bewertung eines Montageschritts immer auch die montagerelevanten Aspekte des Produkts betrachtet werden und die Absicherung produktionsbegleitend erfolgen soll, werden als Maß für die horizontale Testabdeckung in dieser Arbeit die Montageschritte (und nicht etwa die Komponenten oder Baugruppen) verwendet.

Im Laufe der Serienentwicklung wird ein Montageschritt hinsichtlich des gleichen Aspekts womöglich mehrfach und bei verschiedenen Produktvarianten bewertet. Im Hinblick auf eine Reifegradmessung müssen die Einzelbewertungen zu einem Gesamtergebnis in der jeweiligen Kategorie aggregiert werden. Die Bewertungen der verschiedenen Eigenschaften müssen wiederum zu einer Gesamtbewertung für den Montageschritt und weiter zu einer Bewertung des gesamten Montageprozesses aggregiert werden. **Abbildung 45** stellt die Zusammenhänge schematisch in einem Datenmodell dar. Weiterhin ist bei der Reifegradermittlung zu berücksichtigen, dass sich ein Montageschritt durch die fortschreitende Entwicklung womöglich ändert und eine neue Revision zu evaluieren ist. Bei umfangreicheren Änderungen an Produkt- oder Montagekonzept können Schritte auch entfallen oder neue hinzukommen. Ob eine Änderung eine (teilweise) Neubewertung erforderlich macht, kann dabei nicht pauschal beantwortet werden. Heute wird dies meist situativ und subjektiv durch Planer oder Montagespezialisten entschieden. Die systematische, objektive Beurteilung solcher Fälle stellt eine Herausforderung für die angestrebte Reifegradbewertung dar.

Wird ein Montageschritt bewertet, so kann neben dem Bewertungsergebnis auf Basis der Metadaten, welche die Rahmenbedingungen der Bewertung beschreiben, auch eine Indikation über die Aussagekraft bzw. Verlässlichkeit der Ergebnisse angegeben werden. Dieses Maß für die Qualität einer Bewertung wird in dieser Arbeit als Konfidenz bezeichnet. Je nach der Bewertungsmethode (z.B. sensorische Messung oder subjektive Beurteilung), dem Bewertungsumfeld (virtueller Raum, physisch im Laborumfeld, physisch seriennahes Umfeld, physisch seriengleiches Umfeld), dem Bewertungsgegenstand (z.B. 3D Modell, Versuchsteile aus Ersatzmaterialien, seriennahe Versuchsteile oder Serienteile) sind die Bewertungsergebnisse mehr oder weniger belastbar. Diesem Umstand soll durch die Angabe der Konfidenz Rechnung getragen werden, wenngleich die Bestimmung bzw. Berechnung dieser Angabe ebenfalls eine Herausforderung darstellt.

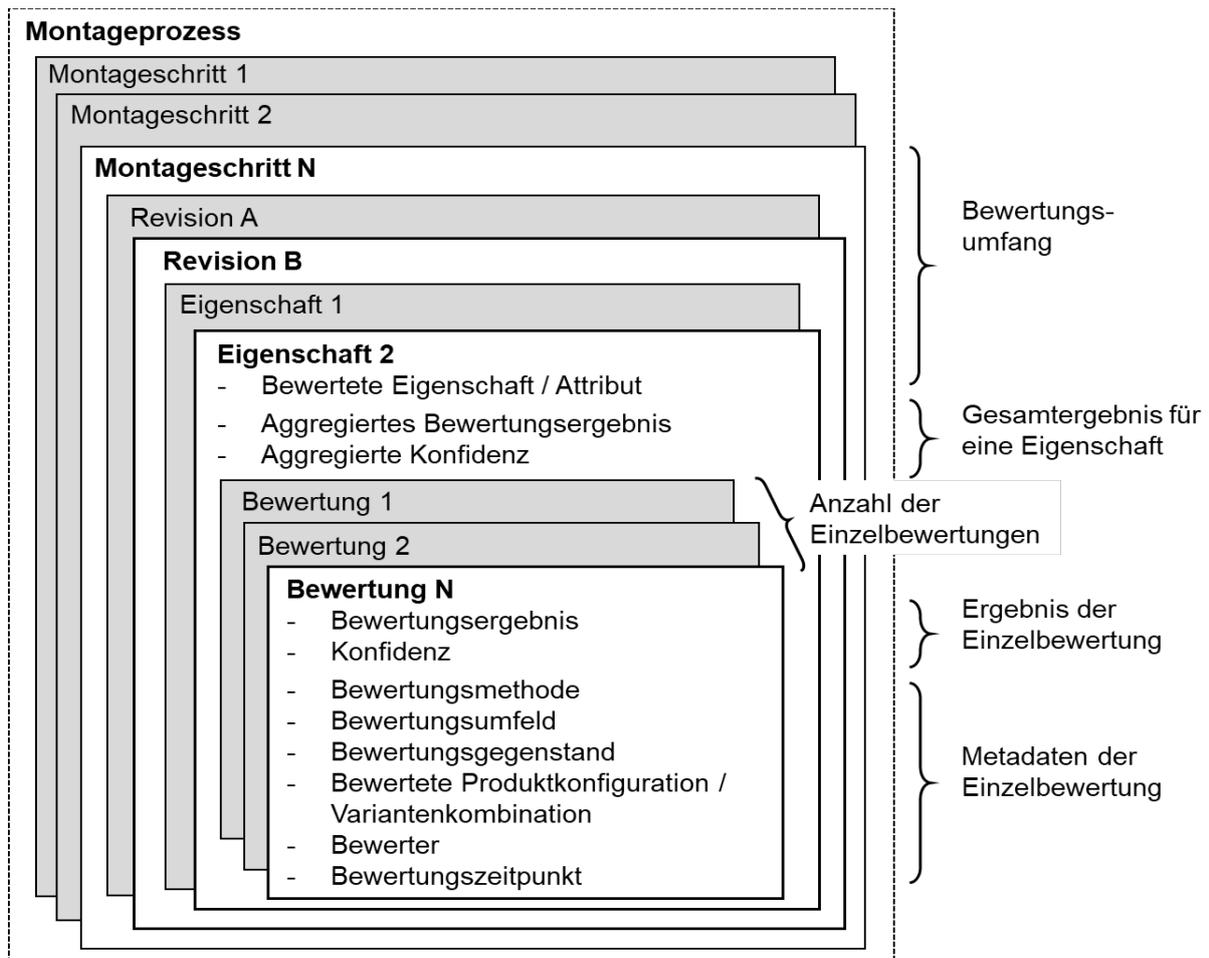


Abbildung 45: Vereinfachtes Datenmodell für die Bewertung von Montageschritten

Auch der Bewerter (z.B. Erfahrung, Gewissenhaftigkeit, Motivation), der Zeitpunkt der Bewertung und diverse weitere Faktoren können das Bewertungsergebnis und die Validität der Bewertung natürlich beeinflussen. Derartige Faktoren zu berücksichtigen dürfte jedoch in der Praxis kaum möglich sein, weshalb die Betrachtung hier auf die drei oben genannten Faktoren beschränkt wird. Bei der Zusammenfassung der Einzelbewertungen zu einer Gesamtbewertung könnten die Einzelbewertungen auf Basis ihrer Konfidenz gewichtet werden. Auch die Anzahl der Bewertungen eines bestimmten Merkmals kann bei der Bestimmung der Konfidenz der aggregierten Bewertung berücksichtigt werden.

Bei der Auswertung der Absicherungsergebnisse im Hinblick auf die Ermittlung des Absicherungsfortschritts bzw. des Reifegrades stellt sich die Frage nach der angestrebten sowie der tatsächlich erreichten Testabdeckung. Dazu muss bei der horizontalen Testabdeckung neben der Zahl der Montageschritte auch die Variantenabhängigkeit innerhalb der Montageschritte berücksichtigt werden, da die Konfiguration des Produkts einen nicht unmittelbar offensichtlichen Einfluss auf den Montageablauf haben kann. Werden Varianten bei der Absicherung vernachlässigt, kann es später in der Serie bei einer Variante zu unerwarteten Problemen kommen, obwohl eine andere, vermeintlich äquivalente Variante bereits frühzeitig erfolgreich abgesichert wurde. Ein Beispiel hierfür wäre die Montage einer Dekorleiste, welche in vielen unterschiedlichen Farb- und Materialvarianten bestellt werden kann, wovon eine Variante

besonders kratzerempfindlich ist, während eine andere aufgrund eines spröderen Werkstoffs zu Brüchen neigt. Bei der Montage führen diese Varianten zu einer hohen Ausschussquote und entsprechendem Nacharbeitsaufwand. Da Serienteile in unterschiedlichen Dekorvarianten aus Kostengründen meist erst spät in der Vorserie oder im Hochlauf verfügbar sind und im Prototypenbau meist günstigere Komponenten der Grundausstattung verwendet werden, sind derartige Einflüsse kaum frühzeitig erkennbar. Ähnlich verhält es sich mit seltenen bzw. außergewöhnlichen Kombinationen von Sonderausstattungen.

Da Fahrzeuge heute aufgrund der über die letzten Jahrzehnte stark vorangetriebenen Individualisierung eine extreme Variantenvielfalt aufweisen und bestimmte Konfigurationen über den gesamten Produktionszyklus nur wenige Male gebaut werden, ist eine vollständige Absicherung aller möglicher Konfigurationen in der Praxis unrealistisch. Dennoch soll das hier diskutierte Modell den Absicherungsstand möglichst vollumfänglich beschreiben, um eine Transparenz hinsichtlich der Absicherungslücken zu erzeugen. Es muss den Anwendern dabei jedoch bewusst sein, dass eine vollständige Absicherung aller Varianten weder ökonomisch sinnvoll, noch praktisch erreichbar ist.

Die Variantenabhängigkeit in einem Montageschritt ergibt sich einerseits aus der Menge der zu Beginn des Montageschritts potenziell anzutreffenden Ausgangssituationen und andererseits aus den Varianten der im betrachteten Montageschritt zu montierenden Komponenten. Wird unter Vernachlässigung von Toleranzeinflüssen und möglichen Montagefehlern im bestehenden Aufbau davon ausgegangen, dass die Montagesituation nur durch die, unmittelbar an die zu montierenden Komponenten angrenzenden, bereits montierten Komponenten bestimmt wird (situationsbestimmende Komponenten), lässt sich die Zahl der, für einen Montageschritt (im ungünstigsten Fall), abzusichernden Variantenkombinationen (VK) wie folgt ermitteln:

$$n_{vk} = \prod_{i=1}^{n_{sk}} v_{sk i} \times \prod_{i=1}^{n_{mk}} v_{mk i}$$

| | |
|------------|---|
| n_{vk} | Zahl der potenziell abzusichernden Variantenkombinationen |
| n_{sk} | Zahl der situationsbestimmenden Komponenten |
| $v_{sk i}$ | Variantenanzahl der situationsbestimmenden Komponente i |
| n_{mk} | Zahl der im Montageschritt zu verbauenden Komponenten |
| $v_{mk i}$ | Variantenanzahl der zu montierenden Komponente i |

Ein Montageschritt wäre also vollständig bewertet, wenn jede relevante Eigenschaft bzw. jeder abzusichernde Aspekt für jede mögliche Variantenkombination bewertet ist. Dabei ist zu beachten, dass sich bestimmte Kombinationen in der Regel technisch ausschließen oder durch Konfigurationsregeln verhindert werden und somit nicht betrachtet werden müssen. Werden die verbleibenden Variantenkombinationen hinsichtlich ihrer montagerelevanten Unterschiede bewertet, lassen sich potenziell Kombinationen zusammenfassen. Existiert in einem Montageschritt keine Variantenabhängigkeit, so ist nur die Grundvariante zu betrachten. Zudem müssen nicht alle VK zwingend hinsichtlich aller abzusichernder Aspekte separat bewertet werden, ggf. können Absicherungsergebnisse anderer VK übernommen werden. Weiterhin sind nicht alle grundsätzlich zu bewertenden Eigenschaften bzw. Aspekte für jeden Montageschritt relevant. Hier soll jedoch zunächst vom ungünstigsten Fall ausgegangen werden, womit sich die

Anzahl der im Projekt erforderlichen Bewertungen (im Folgenden Bewertungsumfänge genannt) für eine vollständige Absicherung mittels folgender Formel bestimmen lässt:

$$n_b = \sum_{i=1}^{n_m} (n_{vki} \times n_{ae})$$

| | |
|-----------|---|
| n_b | Zahl der Bewertungsumfänge |
| n_m | Zahl der Montageschritte |
| n_{vki} | Variantenkombinationen im Montageschritt i |
| n_{ae} | Zahl der zu bewertenden Aspekte / Eigenschaften |

Unter der Annahme, es sei möglich die aus Montagesicht relevanten Variantenkombinationen sowie die je Montageschritt und Variantenkombination tatsächlich abzusichernden Aspekte und Eigenschaften zu ermitteln, reduziert sich die Zahl der, für eine vollständige Absicherung tatsächlich erforderlichen Bewertungsumfänge zu:

$$n_b^* = \sum_{i=1}^{n_m} \left(\sum_{j=1}^{n_{vki}^*} n_{aeij} \right)$$

| | |
|-------------|--|
| n_b^* | Zahl der relevanten Bewertungsumfänge |
| n_m | Zahl der Montageschritte |
| n_{vki}^* | relevante Variantenkombinationen im Montageschritt i |
| n_{aeij} | Zahl der im Montageschritt i für die Variantenkonfiguration j zu bewertenden Aspekte / Eigenschaften |

Eine Eigenschaft kann als bewertet betrachtet werden, sofern die aggregierte Konfidenz ein gewisses gefordertes Maß erreicht hat. Beispielsweise könnte ein Unternehmen definieren, dass eine rein virtuelle Beurteilung ergonomischer Aspekte für Arbeitsplätze mit kritischen Körperhaltungen oder großen Lasten nicht ausreichend ist und stattdessen mindestens eine Evaluierung im Laborumfeld mit Versuchsteilen fordern. Ebenso könnte gefordert werden, dass bei einer subjektiven Experteneinschätzung mindestens zwei Einzelbewertungen durch unterschiedliche Personen vorgenommen werden müssen. Die Zahl der vollständig bewerteten Umfänge ergibt sich damit aus der Menge der Bewertungen, deren Konfidenz das geforderte Minimum übersteigt:

$$n_{be} = |\{b \mid k_b > k_z\}|$$

| | |
|----------|--|
| n_{be} | Zahl der vollständig bewerteten Umfänge |
| b | Bewertung |
| k_b | aggregierte Konfidenz für den Bewertungsumfang |
| k_z | geforderte Konfidenz (Ziel) |

Ist die geforderte Konfidenz erreicht und das aggregierte Bewertungsergebnis zudem positiv, so kann die bewertete Eigenschaft für den Montageschritt und die betrachtete Variantenkombination als abgesichert gewertet werden. Die Anzahl der abgesicherten Umfänge ergibt sich somit aus der Menge der Bewertungen, deren Konfidenz und Bewertungsergebnis das geforderte Maß übersteigen:

| | | |
|--|----------|--|
| $n_{ab} = \{b \mid e_b > e_z \wedge k_b > k_z\} $ | n_{ab} | Zahl der abgesicherten Umfänge |
| | b | Bewertung |
| | e_b | aggregiertes Ergebnis für den Bewertungsumfang |
| | k_b | aggregierte Konfidenz für den Bewertungsumfang |
| | e_z | gefordertes Absicherungsergebnis (Ziel) |
| | k_z | geforderte Konfidenz (Ziel) |

Damit lassen sich schließlich die Bewertungsquote (als Maß für den Fortschritt der Absicherungstätigkeit) sowie die Absicherungsquote (als Maß für die Projektreife) angeben:

| | | |
|---|----------|---------------------------------------|
| $Q_{be} = \frac{n_{be}}{n_b^*} \quad Q_{ab} = \frac{n_{ab}}{n_b^*}$ | Q_{be} | Bewertungsquote |
| | n_{ab} | Zahl der bewerteten Umfänge |
| | Q_{ab} | Absicherungsquote |
| | n_{ab} | Zahl der abgesicherten Umfänge |
| | n_b^* | Zahl der relevanten Bewertungsumfänge |

Bei der Interpretation dieser Angaben muss berücksichtigt werden, dass die hier diskutierte Absicherungsquote die Projektreife lediglich aus Montagesicht bewertet und funktionale Defizite oder konzeptionelle Anpassungen im Produkt auch in fortgeschrittenen Projektphasen noch zu umfangreichen Änderungen und somit zu einem Absinken der Absicherungsquote führen können. Beispielsweise kann ein Produkt zwar alle aus Sicht der Produktion relevanten Anforderungen erfüllen, aufgrund mangelhafter Produktsicherheit und daraus resultierender Verweigerung der Zulassung dennoch zu einem ökonomischen Misserfolg führen. Für eine gesamthafte Beurteilung des Projektfortschritts ist daher auch der Stand der (funktionalen) Produktabsicherung einzubeziehen, was jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit liegt.

5.2 Entwurf eines Assistenzsystems zur Anwendung der geplanten Serienprozesse in der Prototypenmontage

Nachdem im vorhergehenden Abschnitt Modelle für die wesentlichen Themenbereiche der Methode entwickelt wurden, folgt nun darauf aufbauend die Ausarbeitung der drei wesentlichen Methodenbestandteile. Den Anfang bildet die Entwicklung einer Vorgehensweise, die es ermöglicht die geplanten Serienprozess mithilfe eines Montageassistenzsystems in der Prototypenmontage anzuwenden und dabei abzusichern. Dabei wird im Kontext des Datenmodells auch eine Methodik für die Montageplanung vorgestellt, die es ermöglicht die Daten in der benötigten strukturierten Form zu erzeugen.

Um verschiedene Planungsstände erproben und Änderungen in der Planung unmittelbar abbilden zu können, sollte der Prozess von der Produktentwicklung und Montageplanung über die Logistik und Arbeitsvorbereitung bis in die Montage möglichst durchgängig automatisiert und ohne manuelle Planungstätigkeiten ablaufen. Beispielsweise sollte eine Änderung an der Montagereihenfolge automatisch dazu führen, dass die Arbeitsvorbereitung aufgefordert wird Betriebsmittel in eine andere Zone umzuziehen und die Logistik die Bereitstellungsorte anpasst. Die Montageassistenzsysteme in den betroffenen Zonen müssen natürlich ebenfalls

dazu passend den aktualisierten Prozess anzeigen. So lassen sich Änderungen im Rahmen der iterativen Entwicklungs-, Korrektur und Optimierungszyklen schnell anwenden und überprüfen, wodurch eine frühzeitige Fehlererkennung begünstigt und die Entwicklung beschleunigt wird. Zudem steigt dadurch die Flexibilität der Prototypenmontage erheblich.

In einem ersten Schritt müssen dazu aus den vorhandenen Daten der Produktentwicklung und Montageplanung automatisiert fahrzeug- bzw. auftragsspezifische Arbeitsanweisungen in maschinenlesbarer Form (strukturierte Datensätze) erzeugt werden. Da die Planung für die Struktur der Serienlinie erfolgt, sind die generierten Inhalte anschließend auf die Struktur der Prototypenmontage zu übertragen. Zudem sind bei der Montage der Prototypen gewisse Sonderumfänge zu berücksichtigen, wie zusätzliche Komponenten oder Prüfungen. Diese müssen an geeigneter Stelle in den abgeleiteten Prozess integriert werden.

Die maschinenlesbare Form soll einerseits die situations- und bedarfsgerechte Informationsbereitstellung in den jeweiligen Arbeitsschritten und andererseits die Ansteuerung von digitalen Betriebsmitteln ermöglichen. Diese wiederum erleichtern die Montageaufgabe und beugen menschlichen Fehlern vor, erlauben die automatische Dokumentation von Prozessdaten und stellen die Einhaltung des vorgegebenen Prozesses sicher. Die Präsentation der Informationen muss in eine intuitiv verständliche Art und Weise erfolgen, um den Schulungsaufwand zu minimieren, eine schnelle Informationsaufnahme zu ermöglichen und die mentale Belastung bzw. Ablenkung des Werkers zu minimieren. Um die Montageleistung nicht zu beeinträchtigen und die Akzeptanz bei den Anwendern zu steigern, sollte die Interaktion bei der Nutzung des Systems auf ein Minimum reduziert werden. Die im Folgenden vorgestellten Lösungsansätze basieren auf den in den Abschnitten 5.1.1 bis 5.1.4 erarbeiteten Modellen.

5.2.1 Planungsmethodik und Datenmodell

Wie die Produktentwicklung wird auch die Montageplanung heute umfassend durch IT-Systeme unterstützt und wie bereits dargelegt, baut die Montageplanung auf der Produktstruktur auf. Für alle Umfänge der Produktstruktur müssen die Planer Montageschritte definieren, Arbeitsanweisungen formulieren, Ausführungszeiten bestimmen und schließlich im Rahmen der Abtaktung einen Montageort festlegen. Potenziale für die durchgängige Datennutzung in der Planung wie auch der Produktion entstehen dabei, wenn die Produktstrukturdaten im Planungsprozess systematisch mit den Prozessdaten verknüpft werden. Dies wird im Rahmen dieser Arbeit als Produkt-Prozess-Kopplung (PPK) bezeichnet. Die Kopplung von Produkt- und Prozessdaten stellt keine grundsätzlich neue Idee dar. Beispielsweise regte Müller bereits vor einigen Jahren im Kontext von PDM-Systemen dazu an, mittels verknüpfter Datenstrukturen eine Brücke zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung herzustellen, ohne jedoch auf die konkrete Umsetzung einzugehen (vgl. [58, S. 130-132]). Teilweise verfügt auch in der Praxis anzutreffende Planungssoftware bereits über entsprechende Funktionen. Im Folgenden wird dargelegt, wie eine logische Verknüpfung der Produkt- und Prozessdaten so gestaltet werden kann, dass sich damit automatisiert auftragsspezifische Montageanweisungen und Materialabrufe erzeugen lassen. Die Anwendung dieses Konzepts durch die Montageplanung stellt eine Voraussetzung für die Nutzung der hier beschriebenen Methode und den Einsatz des entwickelten Assistenzsystems dar. Der Nutzen ist jedoch

keineswegs auf die Vorserie beschränkt, auch in der Serie eröffnet die mit diesem Konzept erreichbare Datenqualität vielfältige Möglichkeiten.

Jedes Bauteil bzw. jede Baugruppe besitzt eine logische Verbindung zu mindestens einem Prozessschritt, nämlich dem, bei dem es in das Fahrzeug bzw. den Vormontageumfang eingebracht wird. Eine Komponente kann jedoch auch noch Gegenstand weiterer Prozesse sein, wenn sie in einem Prozessschritt eingebracht und dann in einem oder mehreren weiteren Arbeitsschritten manipuliert wird. Es können also verschiedene Arten der Beziehung existieren. In dieser Arbeit werden Montagekopplungen (initiales Einbringen und Positionieren), Verbindungskopplungen (Herstellung einer Verbindung) und Zusatzkopplungen (andere Transaktion mit einer bereits eingebrachten Komponente) unterschieden.

Zur Veranschaulichung dieses Konzepts kann erneut das Beispiel der Lenksäule herangezogen werden. Nachdem die Lenksäule auf der Tragstruktur positioniert wurde, sind im nächsten Schritt vier Schrauben aufzunehmen und per Hand einige Umdrehungen einzudrehen. Anschließend erfolgt mittels Akkuschrauber ein Voranzug mit geringem Drehmoment. Da es sich bei der Lenksäule um eine sicherheitskritische Komponente handelt, muss der Endanzug mit einem digitalen Schraubsystem erfolgen das den Verlauf des Drehmoments und weiterer Parameter im Schraubprozess überwacht und aufzeichnet. Um dies im Datenmodell abzubilden, verfügt die Positionsvariante der Schrauben über zwei Verbindungsparametersätze (VPS), den ersten mit den Parametern für das Anheften und den zweiten mit den Endanzugsparametern. Die vier Arbeitsschritte und ihre Beziehungen zu den Positionen in der Produktstruktur sind in **Abbildung 46** dargestellt.

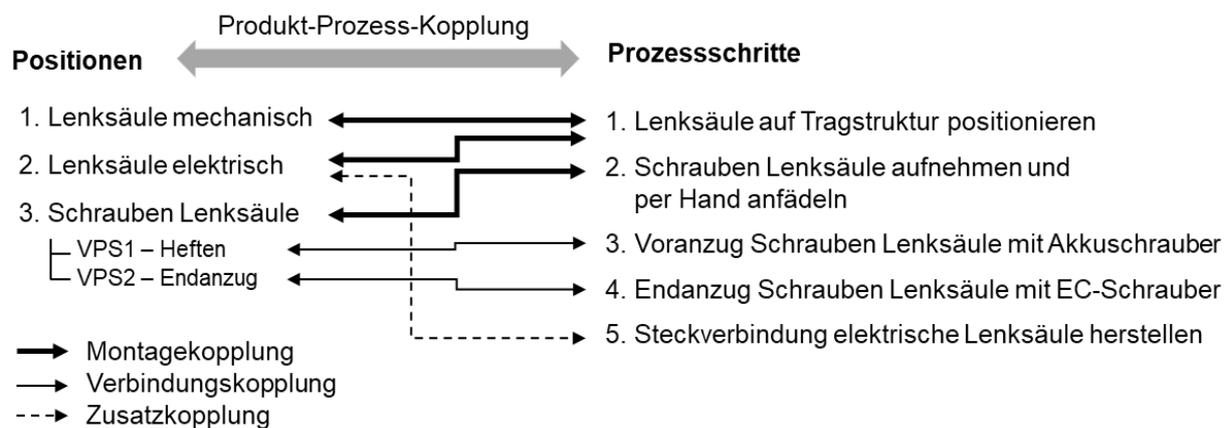


Abbildung 46: Logische Verknüpfung von Produktstruktur und Montageprozess mittels Produkt-Prozess-Kopplung am Beispiel der Lenksäule

Wenn die fahrzeugspezifische Positionsliste eine der beiden Lenksäulenvarianten enthält, ist der erste Arbeitsschritt auszuführen. Enthält sie auch die Position drei, so sind auch die Arbeitsschritte zwei bis vier auszuführen. Der fünfte Schritt ist lediglich bei der elektrisch verstellbaren Variante erforderlich. Für dieses Gedankenspiel soll nun angenommen werden, dass die Tätigkeiten auf drei Arbeitsplätze (AP1, AP2 und AP3) verteilt werden. Schritt eins erfolgt an AP1, die Schritte zwei und drei an AP2 und die Schritte vier und fünf an AP3. Die Montagekopplung signalisiert an welchem Arbeitsplatz die Teile einer Position bereitgestellt werden müssen. In diesem Beispiel die beiden Varianten der Lenksäule an AP1, die Schrauben an

AP2. Durch die Verbindungskopplung auf der Ebene der zu einer Positionsvariante gehörenden Verbindungsparametersätze ist erkennbar, in welchem Schritt bzw. an welcher Station welche Betriebsmittel für das Herstellen einer Verbindung benötigt werden. In diesem Fall der Akkuschrauber an AP2 und das Schraubsystem an AP3.

Der Kabelbaum (KBB) im Cockpit stellt ein Beispiel für einen Umfang mit komplexen Beziehungen dar. Für dieses Szenario soll vereinfachend angenommen werden, dass es mit der Art der Lenksäulenverstellung und dem HeadUp-Display lediglich zwei Ausstattungsoptionen mit Auswirkung auf den Kabelbaum und seinen Montageprozess gibt. Da die vollständige Verlegung deutlich mehr Arbeitszeit erfordert, als in einem Takt zur Verfügung steht und um unterschiedliche Kabelbaumvarianten prozessual abbilden zu können, werden die Tätigkeiten auf mehrere Arbeitsschritte aufgeteilt. Im ersten Schritt wird der Kabelbaum aufgenommen, auf der Tragstruktur ausgerichtet und anschließend an einigen Punkten auf der Fahrerseite befestigt. In einem weiteren Schritt erfolgt dann die Verlegung entlang der Struktur zur Beifahrerseite. Diese beiden Schritte sind unabhängig von der Variante in jedem Fall auszuführen. Je nach Variante muss anschließend die Verlegung der Abzweige und Stecker durchgeführt werden.

Wie in **Abbildung 47** ersichtlich ist, können die Beziehungen mit steigender Anzahl der Varianten schnell unübersichtlich werden, daher sollte die Montageplanungssoftware die Planer bei der Erzeugung und Pflege der Kopplungen unterstützen.

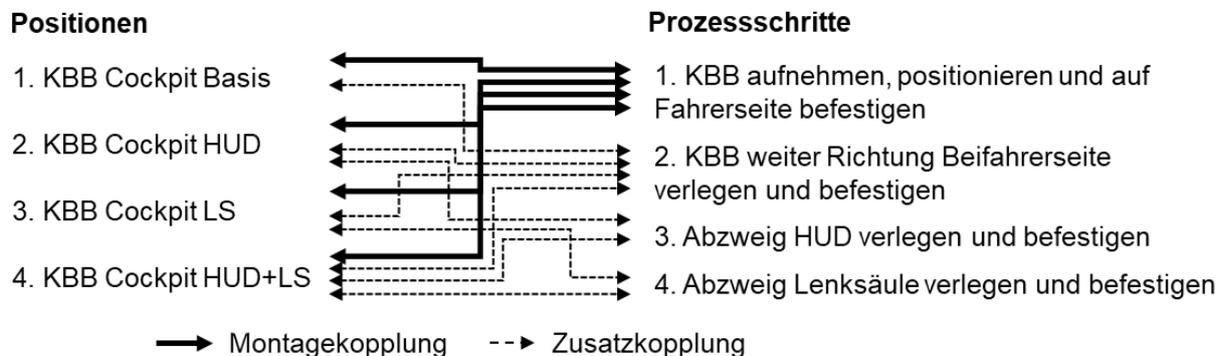


Abbildung 47: Produkt-Prozess-Beziehungen am Beispiel des Kabelbaums im Cockpit

Um die Flexibilität bei der Montageplanung zu steigern, sollte es möglich sein, Positionen mit größeren Mengen auf mehrere Montageschritte aufzuteilen. Bei der Konstruktion wird im Sinne der montagegerechten Produktgestaltung darauf geachtet, die benötigten Verbindungen mit möglichst wenig unterschiedlichen Verbindungselementen und Verbindungsparametersätzen zu realisieren. Die gleichen Verbindungselemente und entsprechend geeignete Werkzeuge werden daher häufig an mehreren Stationen benötigt. Umfasst eine Position viele Verbindungen eines häufig genutzten Typs, kann es zweckmäßig sein, die Position auf mehrere Montageschritte und Arbeitsplätze aufzuteilen, um bei der Abtaktung eine gleichmäßigere Auslastung der Werker erreichen zu können oder unnötige Zusatztätigkeiten durch Bauraumwechsel zu vermeiden. Daher sollten die Produkt-Prozess-Beziehungen bei Montage- und Verbindungskopplungen auch die Kopplung einer Teilmenge erlauben. In Summe müssen die

Mengen der einzelnen Kopplungen einer Position dabei der Gesamtmenge der Position entsprechen.

Auch dieses Szenario soll an einem Beispiel aus der Cockpitmontage veranschaulicht werden, wobei zur Vereinfachung keine Varianten berücksichtigt werden. Ist das Innenleben des Cockpits montiert, wird die große, sperrige Abdeckung mit kratzerempfindlicher Oberfläche von oben auf die Tragstruktur aufgesetzt und mit 16 Schrauben desselben Typs und mit dem gleichen Drehmoment verschraubt. Je Schraube wird eine Ausführungszeit von vier Sekunden kalkuliert. In Summe werden für die 16 Verbindungen daher 64 Sekunden benötigt, wodurch die verfügbare Taktzeit von 58 Sekunden überschritten würde. Um eine Beschädigung der Abdeckung durch Herunterfallen zu vermeiden, sollte sie unmittelbar nach der Positionierung mit mindestens zwei Schrauben angeheftet werden. Das Cockpit befindet sich zum Positionieren der Abdeckung in einer aufrechten Position, 10 der Verschraubungen sind von oben oder von der Vorderseite erreichbar. Im Bereich der Mittelkonsole und des Handschuhfachs müssen jedoch insgesamt sechs Schrauben von unten eingeschraubt werden, was eine Drehung des Werkstückträgers erfordert. Verschraubungen des gleichen Typs werden auch für die unteren Abdeckungen des Cockpits im Fußraum an der folgenden Station verwendet. Die Montage der unteren Abdeckungen lastet einen Takt nicht aus. Es ist daher zweckmäßig, die 16 Verschraubungen auf zwei Montageschritte aufzuteilen und diese an den zwei Arbeitsstationen einzuplanen. Im Datenmodell lässt sich dieses Szenario abbilden, indem eine Teilkopplung vorgenommen wird, wie in **Abbildung 48** dargestellt.

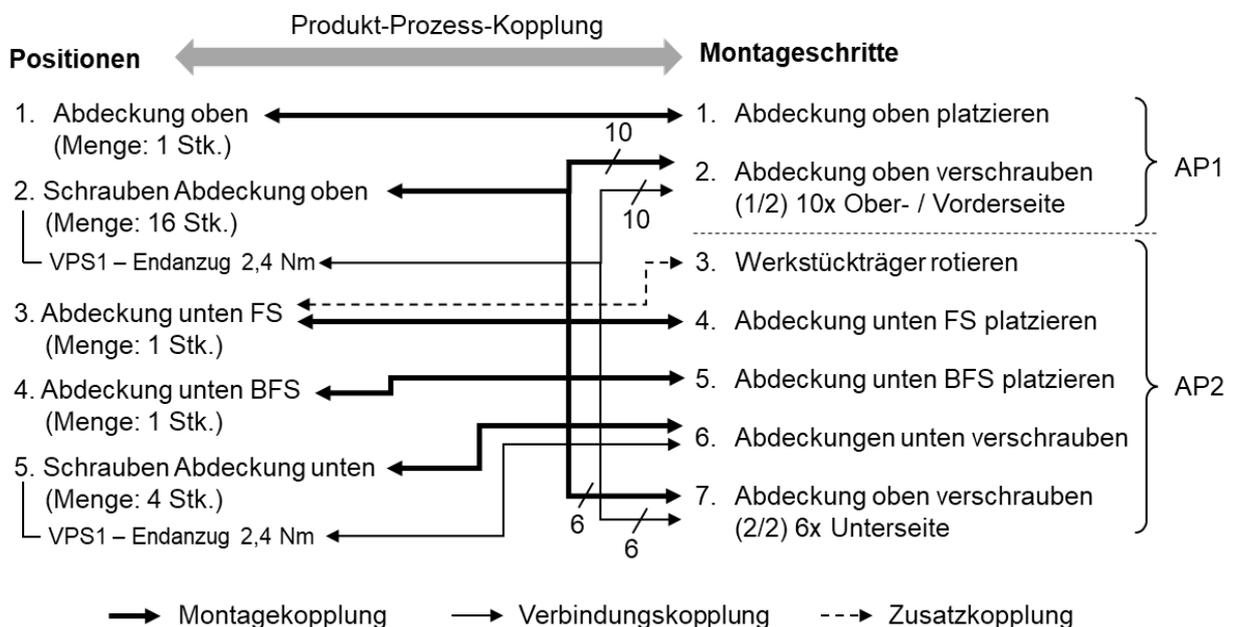


Abbildung 48: Die Verschraubung der Cockpitabdeckung als Beispiel für die Aufteilung einer Position auf mehrere Montageschritte

An der ersten Station wird die Abdeckung in aufrechter Position platziert (geschätzte Ausführungszeit: 15 Sekunden), anschließend werden die zehn in dieser Lage erreichbaren Verschraubungen durchgeführt, was eine gesamte Ausführungszeit von 55 Sekunden und somit eine gute Auslastung der Taktzeit ergibt. An der nächsten Station rotiert der Werker den

Werkstückträger um 180 Grad (5 Sekunden), platziert die beiden Fußraumabdeckungen (10 Sekunden), verschraubt diese mit je zwei Schrauben und erledigt anschließend die sechs noch fehlenden Verschraubungen der oberen Abdeckung. Somit wird auch an dieser Station mit 55 Sekunden eine gute Auslastung erreicht.

Erfolgt die Teilkopplung datentechnisch auf der Ebene der zur Position gehörenden Instanzen (welche die einzelnen Elemente mit ihren Lagekoordinaten repräsentieren), so ist auch klar definiert, welche Verbindungselemente in welchem Montageschritt bearbeitet werden sollen. Bei Verbindungskopplungen kann durch Angabe einer Sequenz für die Instanzen eine Verbindungsreihenfolge definiert werden.

Auf Basis der vorgestellten Methodik lässt sich der, in Abschnitt 5.1.1 beschriebene Prozess der Stücklistenauflösung, wie in **Abbildung 49** dargestellt, zur Erzeugung einer auftragsspezifischen Liste der erforderlichen Montageschritte erweitern, wodurch für jedes Fahrzeug ein individueller Montageprozess generiert werden kann. Wird diese Liste mit der Abtaktung, also der Information darüber, welcher Montageschritt an welchem Arbeitsplatz auszuführen ist kombiniert, lässt sich für jeden Arbeitsplatz eine Liste der abzuarbeitenden Montageschritte (in Montagereihenfolge) und des dafür erforderlichen Materials ableiten. Diese Informationen könnten bereits die Grundlage für ein Montageassistenzsystem im Serienumfeld bilden.

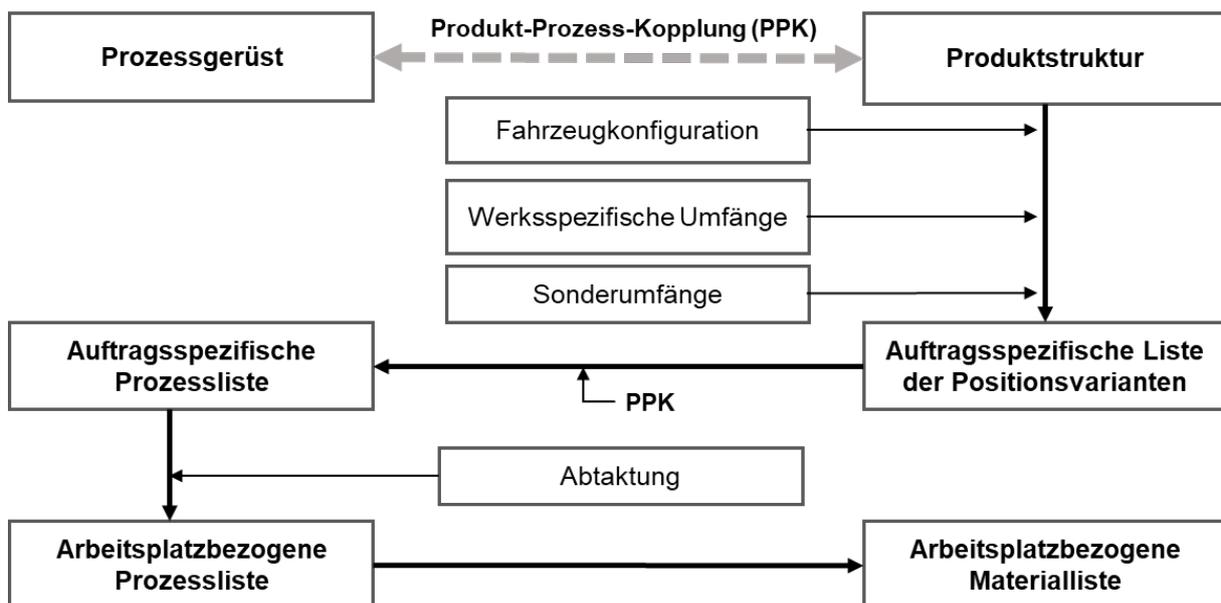


Abbildung 49: Die Kopplung von Prozess- und Produktdaten eröffnet die Möglichkeit auftrags- und arbeitsplatzbezogene Prozess und Materiallisten abzuleiten

Im Vorfeld der Montage müssen jedoch die erforderlichen Ressourcen (Werkzeuge, Montagehilfsmittel und -Stoffe, etc.) geplant und bereitgestellt werden. Durch die PPK ist bei der Planung ersichtlich, welche Verbindungen mit welchen Parametern (VPS) in welchem Montageschritt herzustellen sind, was die Auswahl geeigneter Werkzeuge für den jeweiligen Arbeitsumfang erleichtert. Werden die weiteren Ressourcen bei der Planung ebenfalls mit den Montageschritten verknüpft, so kann nach der oben vorgestellten Logik, wie in **Abbildung 50** illustriert, auch der arbeitsplatzbezogene Ressourcenbedarf abgeleitet werden.

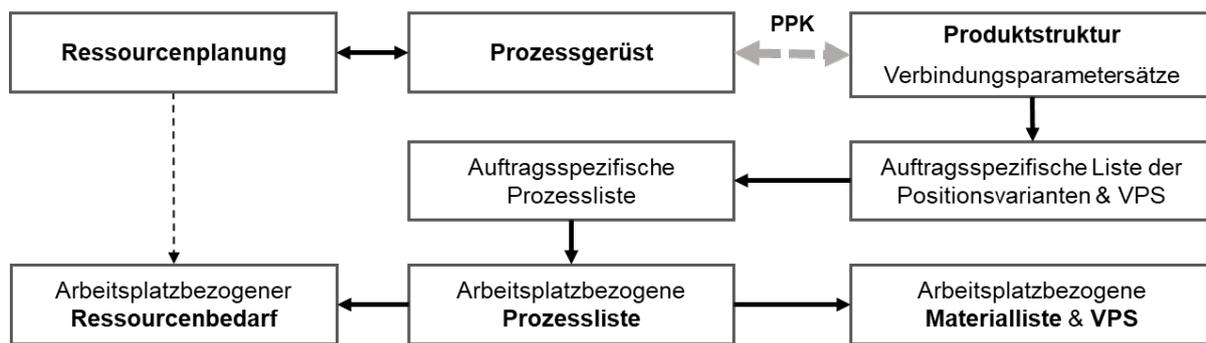


Abbildung 50: Die Verknüpfung der Ressourcenplanung mit den Montageprozessen ermöglicht die Ableitung des auftrags- und arbeitsplatzbezogenen Ressourcenbedarfs

Die Anwendung des vorgestellten Konzepts ermöglicht es somit, alle wesentlichen, in der Produktentwicklung und Montageplanung erzeugten Daten automatisiert für die Montage nutzbar zu machen. Für die Verwendung dieser Daten im Rahmen der Prototypenmontage ist es zunächst noch erforderlich, die Serienmontagestruktur auf die des Prototypenwerks zu übertragen. Wie in den Abschnitten 2.1.2 und 5.1.2 erläutert, ist eine Serienmontagelinie meist in mehrere Bänder mit vielen Takten und hunderten von Arbeitsplätzen untergliedert, während der Prototypenbau in einem werkstattähnlichen Umfeld mit wenigen Arbeitsplätzen stattfindet.

Die Fördertechnik und damit die Lage und Ausrichtung des Montageobjekts sowie die Betriebsmittel stellen bei der Übertragung der Serienprozesse auf die Prototypenstruktur die Hauptkriterien dar. Arbeiten im Bereich des Unterbodens, für die das Fahrzeug in der Serie durch die Fördertechnik in einer geschwenkten Position getragen wird, erfordern auch im Prototypenbau eine entsprechende Vorrichtung. Für die Hochzeit ist ebenfalls ein Gehänge bzw. eine Hebebühne erforderlich. In der Praxis lassen sich die Bänder der Serienstruktur recht einfach zu Bereichen mit einheitlichen Anforderungen an Struktur und Betriebsmittel zusammenfassen. Sind Automatikstationen im Prototypenwerk nicht verfügbar, können meist die manuellen Notprozesse angewendet werden, die bei der Montageplanung für den Fall einer Störung der Anlagen vorgesehen werden. Diese Bereiche werden anschließend ggf. wiederum in Zonen unterteilt, um die Arbeitsinhalte gleichmäßig aufzuteilen. Die Vormontagen bilden meist eine eigene Zone. Mit diesem Vorgehen lässt sich eine Tabelle entwickeln, die alle Arbeitsplätze der Serienmontagelinie auf Zonen der Prototypenmontage zuweist. Das Prinzip ist in **Abbildung 51** illustriert. Für die Validierung im Rahmen dieser Arbeit wurde eine entsprechende Tabelle einmalig manuell erarbeitet. Eine ausreichende Datenverfügbarkeit vorausgesetzt, scheint es jedoch durchaus plausibel, die Zuweisung auf Basis der Ressourcenbedarfe in Kombination mit Daten zur Ausstattung der Montagezonen zu automatisieren. Dabei ist allerdings darauf zu achten, dass die Montagereihenfolge zumindest innerhalb der Bauräume eingehalten wird.

Mit dieser Vorgehensweise lassen sich für jedes Fahrzeug anhand seiner Konfiguration sowie den Produktstruktur- und Montageplanungsdaten automatisiert zonenbezogene Prozess-, Ressourcen- und Positions- bzw. Materiallisten erzeugen, wobei Montageschritte und Montagereihenfolge dem geplanten Serienprozess entsprechen. Diese Informationen stellen die wichtigsten Eingangsdaten für das Assistenzsystem in der Prototypenmontage dar.

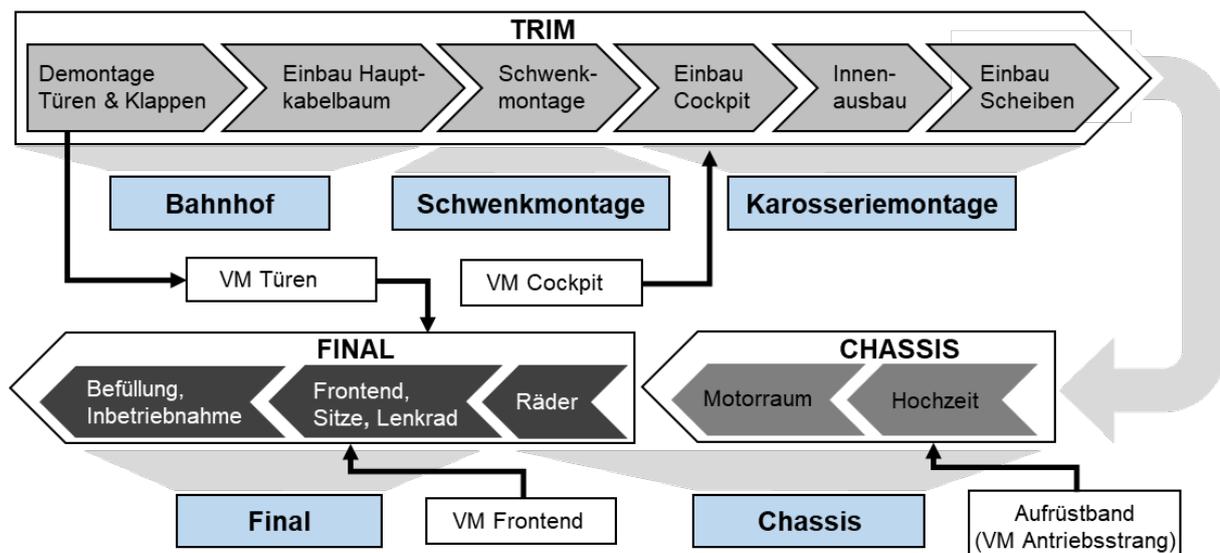


Abbildung 51: Zuordnung der Serienmontagebereiche auf die fünf Zonen (blau) und vier Vormontagen einer Linie des Prototypenwerks

5.2.2 Schnittstellen zur Arbeitsvorbereitung und Logistik

Neben den bisher diskutierten Informationen zu Produkt und Montageprozess ist es für die Realisierung eines Montageassistenzsystems zweckmäßig, auch operative Informationen der Arbeitsvorbereitung (z.B. verfügbare Betriebsmittel) und Logistik (z.B. Lieferinformationen) sowie die Daten der Programmplanung (Auftragsdaten wie Termine und Verwendung) einzubeziehen. Gleichzeitig bildend die Informationen zum Ressourcenbedarf und den benötigten Positionen in Kombination mit dem Produktionsprogramm die Grundlage für die Logistikplanung und die Bereitstellung der Betriebsmittel. Arbeitsvorbereitung und Logistik treten daher einerseits als Informationsempfänger auf, andererseits arbeiten sie mit den Daten und stellen dann wiederum angereicherte bzw. ergänzende Informationen bereit, die für die Montage von Interesse sind. Die daraus resultierenden Datenflüsse sind in **Abbildung 52** dargestellt. Für die erfolgreiche Anwendung der Methode in der Praxis ist es essenziell, dass alle beteiligten Stellen strikt mit der gleichen Datenbasis wie die Montage arbeiten und nicht etwa aufgrund von Nebenabsprachen mit der Entwicklung oder den Verwendern von diesen abweichen. Um Konsistenz zu gewährleisten, müssen Änderungen (beispielsweise eine Anpassung der Fahrzeugkonfiguration) ausnahmslos durch eine Anpassung der Daten in den Quellsystemen erfolgen.

Durch einen Abgleich des auftrags- und zonenspezifischen Ressourcenbedarfs mit ihrem Inventar muss die Arbeitsvorbereitung vor dem Montagestart prüfen, ob alle benötigten Betriebsmittel vorhanden, betriebsbereit und für die durchzuführenden Prozesse eingerichtet sind. Aufgrund ihrer großen Bedeutung für die Fahrzeugmontage steht in dieser Arbeit die Schraubtechnik dabei im Fokus. Bei der Nutzung digitaler Schraubsysteme muss in der Regel für jede Verschraubung auf Basis der Vorgaben der Produktentwicklung ein entsprechendes Schraubprogramm erstellt werden. Aufgrund der dafür erforderlichen Erfahrung und mangels vollständiger Integration der Systeme wird dies nach wie vor manuell durch Experten erledigt. Durch eine automatisierte Prüfung, ob ein geplanter Auftrag Verschraubungen enthält, für die in der jeweiligen Zone kein System mit einem geeigneten Programm verfügbar ist, können diese

jedoch bei ihrer Arbeit unterstützt werden. Auch kann ein Hinweis gegeben werden, wenn die Vorgaben durch die Entwicklung angepasst wurden und ein Programm aktualisiert werden muss. Das Assistenzsystem wiederum benötigt die Information, welche Schraubsysteme in einer Zone vorhanden sind und über welche Werkzeuge mit welchen Programmen diese verfügen, damit es sie im Montageablauf korrekt ansteuern kann.

Auch die Logistik agiert sowohl als Informationsempfänger wie auch als Informationsquelle. Basierend auf Produktionsprogramm und Bedarfsrechnung erfolgt einige Zeit vor Beginn der Prototypenmontage die Beschaffung, Lieferung und Einlagerung der Prototypenkomponenten. In zeitlicher Nähe zum Montagestart muss die Logistik dann für jeden Auftrag die Anlieferung der benötigten Komponenten in die Prototypenmontage planen und durchführen. Die zonen-spezifische Positionsliste, die angibt in welcher Zone die Komponenten einer Position verbaut werden, bildet die Grundlage der Bereitstellungsplanung.

Während der Prototypenphase kann es jedoch vorkommen, dass Montageprozesse noch nicht vollständig oder fehlerhaft geplant worden sind. In diesem Fall würden zu einer Position aus der Positionsliste kein verknüpfter Montageprozess und damit auch kein Montage- bzw. Bereitstellungsart gefunden. Damit ist für die Logistik des Prototypenwerks zunächst nicht klar, in welche Zone die Komponenten geliefert werden müssen. Selbiges gilt für Prototypenkomponenten wie beispielsweise die Tarnung, Diagnoseleitungen oder Not-Aus Taster, die in den Erprobungsfahrzeugen, nicht jedoch den Serienfahrzeugen verbaut werden. Derartige Komponenten werden zwar von der Entwicklung und Konstruktion in der Materialdatenbank angelegt und der Produktstruktur hinterlegt, aufgrund der fehlenden Relevanz für die Serie von der Montageplanung jedoch meist nicht beplant. In diesen Fällen muss die Logistik auf Basis der Produktstruktur und der Materialdaten entscheiden, in welche Zone diese Komponenten geliefert werden sollen.

Ist für jede Position eine Lieferzone definiert, muss anschließend die Behälterplanung vorgenommen werden, wobei wiederum die Materialstammdaten und die Informationen zur Geometrie herangezogen werden. Liegen neben den Geometrie- und Gewichtsdaten der Komponenten ausreichend präzise Informationen zu den verfügbaren Behältern und ggf. besonderen Transportanforderungen der Komponenten (z.B. ESD-geschützte Behälter, Gefahrgut, etc.) vor, kann die Behälterplanung mittels einer Heuristik automatisiert werden. Auf Basis der Information welche Komponenten in welche Behälter bzw. welches Fach eines Ladungsträgers zu packen sind, werden die Komponenten schließlich im Lager auftragsspezifisch kommissioniert und die Behälter anschließend in die jeweilige Zone der Prototypenmontage transportiert. Kleinteile wie Schrauben werden dabei in der Regel nicht für jeden Auftrag einzeln, sondern chargenweise in Schüttgutbehältern angeliefert.

Aufgrund kurzfristiger Änderung der Fahrzeugkonfiguration, Fehlern bei der Beschaffung oder Schwierigkeiten bei der (meist ausgelagerten) Produktion der Prototypenkomponenten, kommt es nicht selten vor, dass die Teile für ein Fahrzeug nicht rechtzeitig im Lager vorhanden sind. Um vermeidbaren Störungen in der Montage vorzubeugen, sollte daher vor dem Montagestart geprüft werden, ob alle für den jeweiligen Auftrag benötigten Teile verfügbar sind. Diese sollten dann in der Lagerverwaltungssoftware auch reserviert werden, so dass sie nicht zwischenzeitlich durch andere Aufträge abgerufen werden.

Sind für einen Auftrag nicht alle Komponenten verfügbar, ist mit der Produktionsplanung abzustimmen, ob der Montagestart verschoben werden muss oder ob die Montage unter Inkaufnahme gewisser Nacharbeit dennoch begonnen wird. Ausschlaggebend ist dabei der voraussichtliche Aufwand für den nachträglichen Verbau der fehlenden Komponenten sowie der geforderte Auslieferungstermin (und die daran geknüpfte Verwendung des Erprobungsfahrzeugs). Mangelt es an einer grundlegenden, frühzeitig zu verbauenden Komponente wie dem Hauptkabelbaum ist der Versuch einer Montage selbst vor dem Hintergrund eines kurz bevorstehenden Liefertermins kaum sinnvoll und würde im Prototypenwerk lediglich zu Unregelmäßigkeiten und weiteren Verzögerungen führen.

Fehlt hingegen lediglich ein Dekorteil oder ein Lautsprecher des Entertainment-Systems, so kann die Montage auch ohne großen Aufwand noch nachträglich erfolgen oder je nach Verwendung des Fahrzeugs ganz entfallen. Für den Werker und damit die hier vorgestellte Methode ist dabei primär von Bedeutung, dass keine elementaren Komponenten fehlen und bekannterweise nicht lieferbare Umfänge als Fehlteile markiert und entsprechend für eine Nacharbeit vorgemerkt werden.

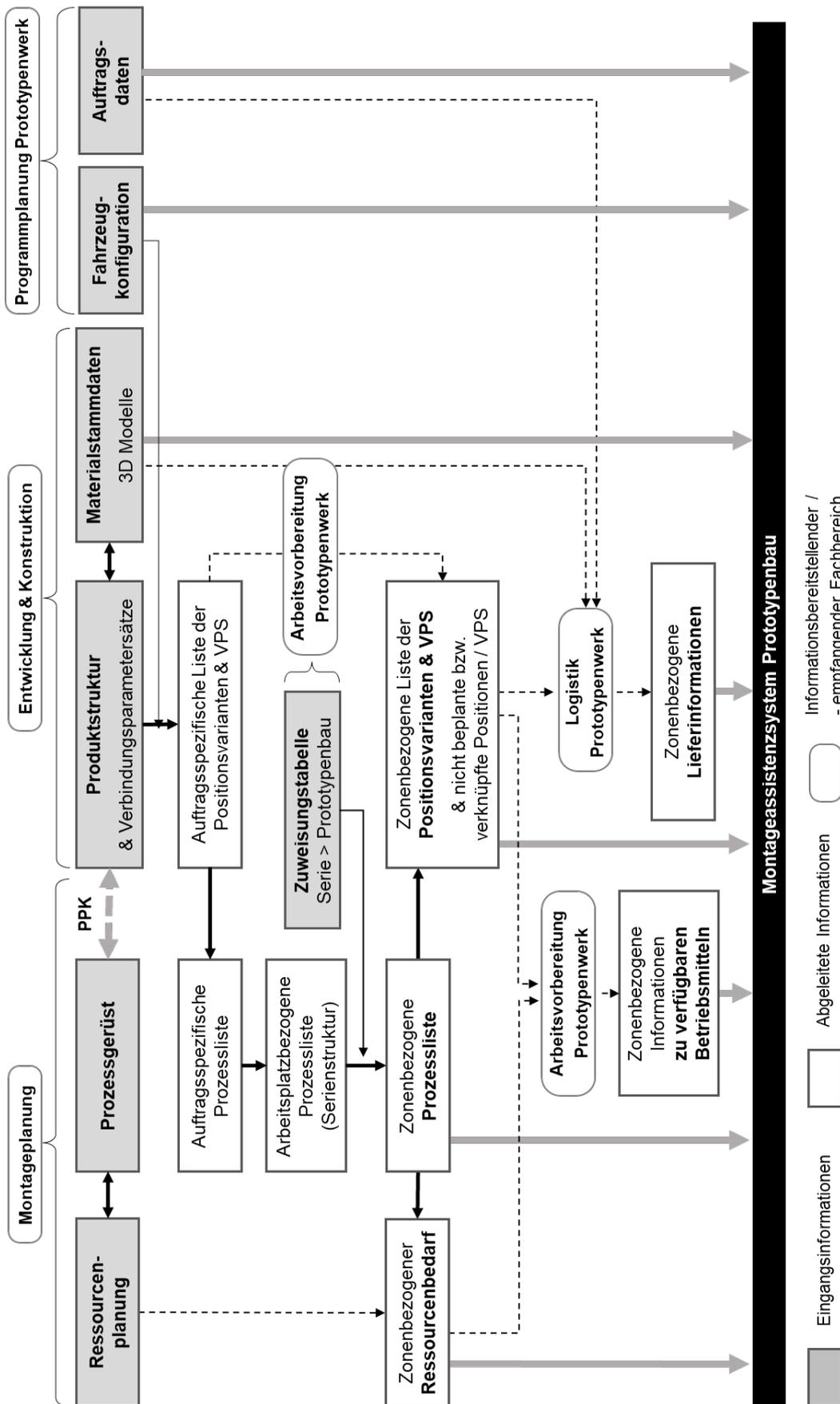


Abbildung 52: Modellierung der Datenflüsse im Kontext der Prototypenmontage

Liegen die logistischen Informationen auch dem Montageassistenzsystem vor, so kann es den Werker im Montageprozess zu den jeweils benötigten Komponenten leiten und ihm somit die Suche erleichtern oder im Fall von Fehlteilen eine unnötige Suche ersparen. Werden Komponenten in Behältern mit digitaler Kennzeichnung bzw. Signalisierung (beispielsweise Pick-by-Light Regalen) bereitgestellt, kann das Assistenzsystem die Ansteuerung dieser übernehmen.

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Konzepte und Vorgehensweisen liefern die Daten, die für die Realisierung der Grundfunktionen des Assistenzsystems im Umfeld der Prototypenmontage erforderlich sind und bilden somit das Fundament der Methode. Im Folgenden wird beschrieben, wie die Informationen im Montageablauf dargestellt werden können und wie das Assistenzsystem selbst Daten im Prozess erfassen kann, um den Montagefortschritt zu verfolgen und zu dokumentieren.

5.2.3 Darstellung der Arbeitsanweisungen im Montageablauf, Prozessüberwachung und Dokumentation

Um die Arbeitsanweisungen dem Werker im Montageablauf möglichst strukturiert und intuitiv ohne unnötige Interaktion bereitstellen zu können, wird für das Anzeigekonzept das in Abschnitt 4.2.2 eingeführte Modell eines Montageschritts wieder aufgegriffen. Dieses unterteilt einen Montageschritt in eine optionale Phase des Aufnehmens, eine stets existierende Phase der Positionierung (oder sonstiger Montagetätigkeit wie Justage, Reinigung, etc.) sowie eine optionale Phase des Verbindens. Ob die Phasen Aufnehmen und Verbinden in einem Montageschritt erforderlich sind, ist für das Assistenzsystem aus dem Vorhandensein einer Montage- oder Verbindungskopplung in den Daten des Montageschritts erkennbar.

Die Kenntnis darüber, welche Tätigkeit der Werker gerade ausgeführt hat, ermöglicht dem System die situationsbezogenen Bereitstellung der Arbeitsanweisungen, indem nach Abschluss einer Tätigkeit automatisch die Informationen zur darauffolgenden Tätigkeit angezeigt werden. Ist das Aufnehmen der im aktuellen Montageschritt benötigten Komponenten abgeschlossen, werden automatisch die Informationen zur Positionierung dieser angezeigt. Wurden die Komponenten korrekt platziert, können ggf. die Anweisungen für herzustellende Verbindungen eingeblendet werden. Die Erfassung der einzelnen Tätigkeiten im Rahmen der Prozessüberwachung dient jedoch noch weiteren Zwecken. Um die Validität der Erprobungsergebnisse bei Versuchen mit den kostenintensiven Prototypenfahrzeugen zu gewährleisten, muss sichergestellt werden, dass diese im Sinne der Vorgaben korrekt montiert wurden. Dies umfasst die Verwendung der richtigen Komponenten, die vollständige Ausführung aller Montagetätigkeiten und die Einhaltung der vorgegebenen Prozessparameter.

Bei der, im Vergleich zur Serie deutlich fehleranfälligeren Montage der Prototypen sollte daher jede Komponente, die verbaut wird, erfasst und dokumentiert werden. Im einfachsten Fall kann dies realisiert werden, in dem der Werker gebeten wird die Materialnummer zu vergleichen und zu bestätigen, dass er die korrekte Komponente verwendet. Effizienter und zuverlässiger ist jedoch die Erfassung über digitale Betriebsmittel wie optische Scanner oder RFID-Leser. Diese Methoden vereinfachen es zudem nicht nur den Materialtyp, sondern auch eine teilespezifische Seriennummer zu erfassen, was bei komplexeren bzw. kritischeren Komponenten wie Steuergeräten oder Airbags sinnvoll sein kann.

Auch die Nutzung von Sensoren wie Lichtschranken oder Waagen zur Erkennung einer Entnahme aus einem Behälter ist möglich. In der Phase des Aufnehmens zeigt das Assistenzsystem dem Werker dazu neben den Informationen zu den Komponenten selbst auch an, wo die sie zu finden sind (Informationen aus der Behälterplanung der Logistik) und wie sie identifiziert werden sollen, bzw. steuert die Signalisierung des jeweiligen Behälters an. Die Visualisierung der benötigten Komponenten kann mittels der in den Materialstammdaten hinterlegten 3D-Modellen erfolgen.

Wurden alle für den Montageschritt erforderlichen Komponenten positiv identifiziert, zeigt das System die Informationen zur Positionierung der Komponenten an. Dazu wird neben der von der Montageplanung bereitgestellten textuellen Beschreibung der Tätigkeit wiederum eine Visualisierung auf Basis der 3D-Modelle genutzt. Da dem System bekannt ist, welche Komponenten bereits verbaut wurden, können diese geladen werden, um die Ausgangssituation darzustellen. Die zu positionierenden Komponenten können in dieser Darstellung der Montagesituation dann farblich hervorgehoben eingeblendet werden. Umfasst ein Montageschritt keine neuen Komponenten, sondern lediglich eine Transaktion mit bereits im Aufbau enthaltenen Elementen, können analog dazu diese hervorgehoben werden.

Die automatisierte, sensorische Erfassung der vielfältigen in dieser Phase potenziell durchzuführenden Tätigkeiten ist deutlich komplizierter als beim Aufnehmen. Einige Forschungsarbeiten schlagen für diesen Anwendungsfall die Nutzung von Kameras und entsprechenden Bildverarbeitungsalgorithmen vor. Aufgrund der Komplexität derartiger Lösungen wurde in dieser Arbeit jedoch stattdessen auf eine manuelle Quittierung gesetzt. Umfasst ein Montageschritt eine Anlage oder eine Vorrichtung mit Sensorik, so kann auch diese genutzt werden, um dem Assistenzsystem den Abschluss der Tätigkeit zu signalisieren. Durch die Quittierung wird die Tätigkeit im System als erledigt markiert und der nächste Montageschritt angezeigt. Durch die Erfassung eines Zeitstempels lassen sich dabei die tatsächlichen Ausführungszeiten der Montageschritte bestimmen.

Auf eine manuelle Quittierung kann ebenfalls verzichtet werden, wenn ein Montageschritt eine Verbindung umfasst, die mittels eines digitalen Werkzeugs durchgeführt wird. Dem Werker wird dazu neben den Verbindungsparametern auch angezeigt, welches Werkzeug er verwenden soll. Dieses wird durch das Assistenzsystem auf die vorgegebenen Verbindungsparameter eingestellt. Die Quittierung des Montageschritts erfolgt dann durch das Werkzeug, sobald alle Verbindungen ordnungsgemäß hergestellt wurden. Durch solche Betriebsmittel in Kombination mit der Ansteuerung durch das Assistenzsystem wird vermieden, dass Änderungen an den Prozessparametern durch die Werker übersehen werden. Einige Werkzeugtypen ermöglichen neben der Vorgabe der Sollwerte zudem die Messung und Speicherung der Istwerte.

In der stabilen Serienmontage werden nicht zwingend erforderliche Prüfungen weitestgehend vermieden und digitale Werkzeuge meist nur dort eingesetzt, wo eine Erfassung der Prozessparameter aufgrund rechtlicher Anforderungen bzw. für den Fall von Gewährleistungsansprüchen erforderlich ist oder ein hohes Fehlerrisiko besteht. Im Prototypenbau rechtfertigt der potenzielle Schaden hingegen die relativ geringen Kosten und den Mehraufwand für flächendeckende, umfassende Prüfungen und den Einsatz solcher Betriebsmittel. Montagefehler

können durch eine granulare Prozessüberwachung zudem unmittelbar erkannt und der Werker gewarnt werden, wodurch die Nacharbeit zur Behebung der Fehler minimiert wird.

Letztlich lässt sich auf Basis der, im Rahmen der Prozessüberwachung gesammelten Daten eine umfassende Montagedokumentation erstellen, die in der digitalen Fahrzeugakte gespeichert werden kann. Kommt es bei der Verwendung der Prototypen zu Auffälligkeiten, unterstützen diese Daten eine umfassende Ursachenanalyse. Die Auswertung der operativen Montagedaten, wie beispielsweise die Durchlaufzeiten der Zonen, ermöglicht zudem eine Optimierung der Prototypenmontage selbst.

5.3 Umgang mit unvollständigen bzw. fehlerhaften Daten und Problemmanagement

Im vorhergehenden Abschnitt wurde eine Vorgehensweise zur automatisierten Ableitung der, für die Anwendung der geplanten Serienprozesse in der Prototypenmontage erforderlichen Daten vorgestellt. Weiterhin wurde erläutert, wie durch Einbindung von Arbeitsvorbereitung und Logistik in den Informationsfluss das benötigte physische Montageumfeld bereitgestellt werden kann. Die Automatisierung des Prozesses und (im Regelfall) der Verzicht auf manuelle Schritte zur Datenaufbereitung bilden die Voraussetzung für die Absicherung unterschiedlicher Planstände und die umgehende Abbildung von Änderungen im Rahmen der iterativen Serienentwicklung. Anschließend wurde ein Konzept für die Realisierung der Montageassistentenfunktionen auf Basis dieser Daten beschrieben. Diese bilden die Grundlage einer produktionsbegleitenden Absicherung der Serienmontageprozesse, indem sie den Werker in der Prototypenmontage Montageschritt für Montageschritt durch die geplanten Abläufe leiten, die er so prüfen kann. Wären die, dem System bereitgestellten Daten stets vollständig und korrekt, könnte mit dem konzipierten System bereits produktiv gearbeitet werden. Es wäre davon auszugehen, dass sich beispielsweise durch die Vermeidung von Montagefehlern ähnliche Vorteile ergeben, die für den Einsatz von Assistenzsystemen in der Serie sprechen. Da jedoch in der Prototypenphase aufgrund der noch andauernden Serienentwicklung sowohl Produktkonzepte wie auch Montageprozesse noch Defizite aufweisen können, ist davon auszugehen, dass bei der Anwendung des Systems in der Praxis Probleme auftreten würden. Um mit diesen Fällen adäquat umgehen zu können und einen Beitrag zur Reifesteigerung im Rahmen der Serienentwicklung zu leisten, muss ein Montageassistentensystem für den Prototypenbau über Mechanismen zum Umgang mit unvollständigen bzw. fehlerhaften Daten und Funktionen des Problemmanagements verfügen. Diese werden im Folgenden vorgestellt. Es sei angemerkt, dass dieser Teil der Methode weitgehend iterativ entwickelt wurde, indem das Assistenzsystem wie in Kapitel 6 beschrieben prototypisch implementiert, in einem Versuchsumfeld eingesetzt und dann entsprechend der Beobachtungen erweitert bzw. angepasst wurde.

5.3.1 Grundlegende Fehlerarten und Defizite in den Produkt- und Prozessdaten

Aufgrund der potenziell schwerwiegenden Auswirkungen von Fehlern im Produktkonzept bzw. den Produktstrukturdaten sollen entsprechende Defizite möglichst frühzeitig identifiziert und korrigiert werden. Im Rahmen der hier vorgeschlagenen Methode soll bei den ersten Proto-

typen der Fokus darauf liegen, unter Inkaufnahme längerer Montagezeiten die Stimmigkeit des Produktkonzepts und die Korrektheit der Produktdaten (zumindest für die Basisvarianten) zu prüfen und schnell einen weitgehenden vollständigen und konsistenten Datensatz zu erreichen, der die erforderlichen Montageabläufe und die Produkt-Prozess-Beziehungen beschreibt. Dies ermöglicht anschließend einen stabilen und zügigen Montageablauf sowie eine systematische Bewertung und Optimierung. Die wichtigsten Fehler, mit denen gerechnet werden muss und die im ersten Schritt beseitigt werden sollen, sind in **Abbildung 53** dargestellt.

Auf der Seite des Produkts muss zunächst sichergestellt werden, dass alle benötigten Komponenten in Form entsprechender Positionen in der Positionsliste aufgeführt sind und diese auch keine für die jeweilige Produktkonfiguration überflüssigen Umfänge enthält. Bei fehlenden Umfängen sollte aufgrund der Tragweite unterschieden werden, ob diese lediglich aufgrund einer falschen Definition der Variantengültigkeit für das vorliegende Fahrzeug nicht vorgesehen wurden oder ob eine benötigte Position in der Produktstruktur tatsächlich vollständig fehlt. Bei der Absicherung der Produktstrukturdaten sind weiterhin die Mengenangaben in den Positionen zu prüfen.

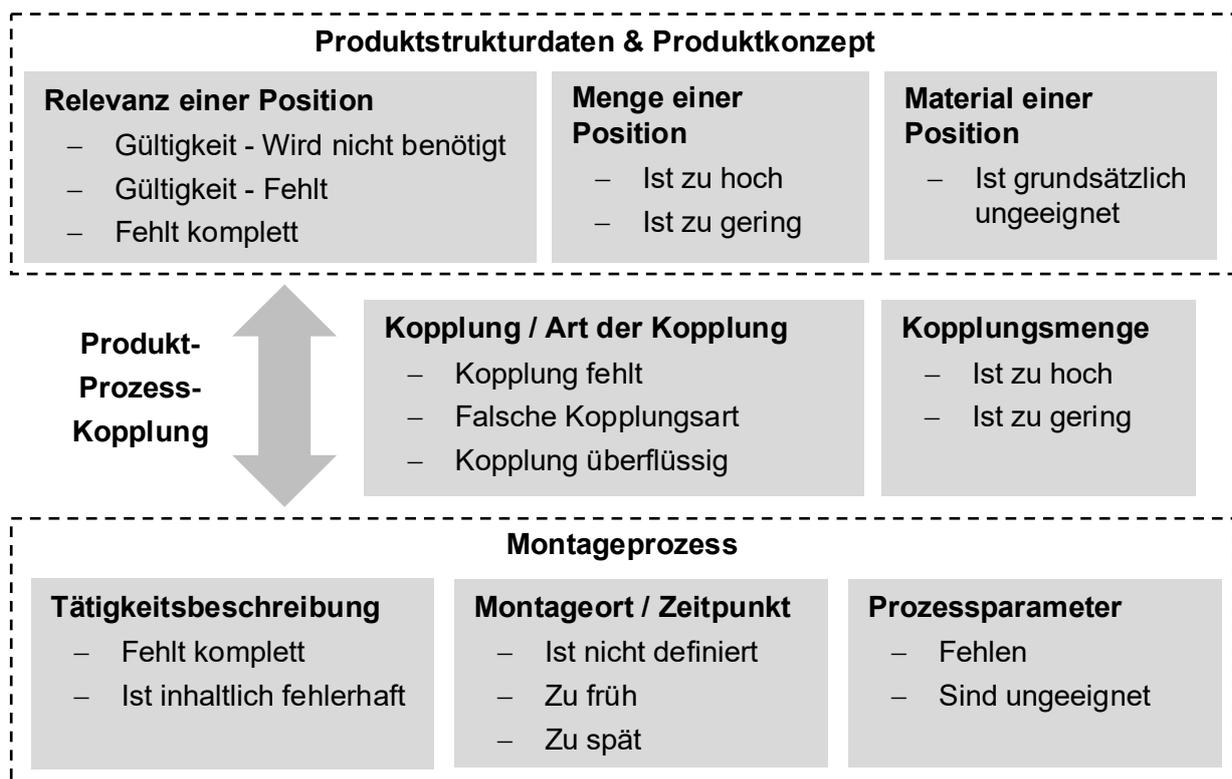


Abbildung 53: Die wichtigsten potenziellen Fehler in Produktkonzept und Produktstrukturdaten, Montageprozessen und den Produkt-Prozess-Beziehungen

Als dritte wesentliche Fehlerart im Bereich des Produkts sind gravierende Fehler oder Inkonsistenzen im Produktkonzept zu nennen. Diese äußern sich in Form ungeeigneten Materials, das selbst in Abwesenheit jeglicher anderen Fehler nicht oder nur mit größerem Aufwand bzw. mit Modifikationen montiert werden kann. Zu dieser Fehlerklasse zählen beispielsweise geometrische Unstimmigkeiten oder Verbindungskonzepte die nicht realisierbar sind bzw. ihre Funktion nicht erfüllen.

Während sich Fehler in der Positionsgültigkeit oder Positionsmenge in der Regel recht schnell und mit geringem Aufwand durch eine Korrektur der Produktstrukturdaten korrigieren lassen, sind komplett fehlende oder grundsätzlich ungeeignete Komponenten je nach ihrer Art und Komplexität potenziell folgenschwerer. Diese Fälle treten jedoch in der Praxis aufgrund der Produktabsicherung im Vorfeld der Prototypenproduktion eher selten auf. Wenngleich sie sich ähnlich auf die Montage auswirken können, sind operative Probleme, wie Fehler der Logistik oder Transportschäden nicht den hier diskutierten Kategorien zuzurechnen und sollten separat betrachtet werden.

Hinsichtlich des Montageprozesses und der Kopplung der Produkt- und Prozessdaten müssen alle benötigten Montageschritte definiert und ihre Variantenabhängigkeit über die Kopplungen korrekt beschrieben sein. Werden in dem, für eine bestimmte Fahrzeugkonfiguration abgeleiteten Montageprozess nicht erforderliche Tätigkeiten aufgeführt, so ist dies auf eine falsche, überflüssige Kopplung zurückzuführen. Fehlen hingegen Tätigkeiten, so kann dies einerseits an fehlenden Kopplungen liegen, was sich wiederum recht einfach korrigieren lässt. Andererseits ist es auch möglich, dass für die fehlenden Tätigkeiten von der Planung noch kein Montageschritt definiert wurde. Auch in diesem Szenario sollte aufgrund der unterschiedlichen Auswirkungen unmittelbar versucht werden die Ursache zu identifizieren. Inhaltlich müssen die Arbeitsanweisungen der Montageschritte die wesentlichen Tätigkeiten korrekt beschreiben. Wird die Beziehung zwischen der Tätigkeit und den Komponenten im Assistenzsystem falsch dargestellt, liegt eine falsche Kopplungsart oder Kopplungsmenge vor.

Sofern ein Montageschritt Tätigkeiten umfasst, für die Prozessparameter erforderlich sind (beispielsweise eine Verschraubung), müssen diese Parameter vorliegen und in einem grundsätzlich geeigneten bzw. realisierbaren Bereich liegen. Letztlich muss jedem Montageschritt ein Montageort zugeordnet sein und die daraus resultierende Fügefolge muss geometrisch realisierbar sein.

Unterschiedliche Fehler können teilweise zu ähnlichen Fehlerbildern bzw. Auswirkungen auf die Montage führen, insbesondere wenn auch operative Fehler berücksichtigt werden. Um die Defizite zielgerichtet beheben zu können, muss aus dem Fehlerbild möglichst eindeutig die Fehlerursache abgeleitet werden. Das Assistenzsystem sollte den Werker entsprechend bei der Identifikation des zugrundeliegenden Fehlers unterstützen.

Treten bei der Prototypenmontage keine Probleme mehr auf, deren Ursache den hier beschriebenen Fehlerarten zuzurechnen ist, so ist die datentechnische Abbildung von Produkt und Montageprozess im Wesentlichen korrekt und vollständig. Der Entwicklungsstand weist dann weitgehend den Reifegrad 1 auf und erfüllt grundlegende Anforderungen aus dem Bereich der produktionsbezogenen Produktabsicherung und der produktbezogenen Prozessabsicherung. Im Hinblick auf eine stabile und effiziente Serienproduktion sind jedoch wie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben noch einige weitere Aspekte und Eigenschaften zu prüfen und ggf. zu optimieren.

5.3.2 Mitigationsmechanismen, automatische Korrektur bzw. Ergänzung der Produkt- und Prozessdaten und Abweichungen vom Serienprozess

Trotz umfassender vorhergehender Absicherung können die im letzten Abschnitt diskutierten Fehlerarten in der Prototypenphase nicht ausgeschlossen werden. Das Assistenzsystem muss daher über Mechanismen verfügen, um die Auswirkungen fehlerhafter Produkt- und Prozessdaten auf die Abläufe in der Prototypenmontage möglichst zu mitigieren. Weiterhin sollten fehlende oder inkorrekte Daten soweit möglich auf Basis der realen Montageabläufe automatisch ergänzt bzw. korrigiert werden, um den Entwicklungs- und Planungsprozess zu unterstützen.

Da die Produktentwicklung der Produktionsplanung vorausgeht und eine (virtuelle) Absicherung der Produktkonzepte aufgrund der Vorlaufzeit für die Beschaffung von Komponenten und Anlagen meist frühzeitiger und umfassender stattfindet, ist die Qualität und Vollständigkeit der Produktdaten zu Beginn der Prototypenphase in der Regel deutlich höher als die der Daten aus der Montageplanung. Da in diesen frühen Planständen Montageschritte gänzlich fehlen oder die Kopplungen der Montage- und Produktdaten fehlerhaft sein könnten, wäre ein daraus abgeleiteter Montageprozess potenziell lückenhaft und der Versuch diesem stringent zu folgen würde, sofern überhaupt ansatzweise erfolgreich, zu einem falsch bzw. unvollständig montierten Fahrzeug führen. Neben den Arbeitsanweisungen aus den Montageprozessdaten müssen den Werkern im Prototypenbau daher auch Informationen aus der Produktstruktur bzw. der fahrzeugspezifischen Positionsliste zur Verfügung gestellt werden, insbesondere zu den Positionen, die mit keinem Montageprozess verknüpft sind. Zu diesen zählen einerseits reguläre Serenumfänge, für die noch kein Montageschritt definiert bzw. verknüpft wurde sowie andererseits Erprobungskomponenten, die lediglich in Prototypen verbaut und daher nicht bei der Serienplanung berücksichtigt werden. Auch Komponenten, die eigentlich nicht benötigt werden, können beispielsweise aufgrund eines inkonsistenten Produktkonzepts oder fehlerhafter Definition der Variantenabhängigkeit in der Positionsliste auftauchen. Wie im Abschnitt 5.2.1 erläutert, stellen derartige Umfänge bereits die Logistik des Prototypenwerks bei der Bereitstellungsplanung vor eine Herausforderung, da mangels Information zum Montageort nicht unmittelbar ersichtlich ist, in welchen Bereich die entsprechenden Komponenten zu liefern sind. Könnte die Logistik auf Basis des Bauraums oder durch Rückfragen an die Montageplanung eine Zone für die Bereitstellung auswählen, muss anschließend der Werker in dieser Zone herausfinden, an welcher Stelle im Montageablauf die Komponenten sinnvollerweise montiert werden können.⁶ Die Information darüber, zu welchem Zeitpunkt der Werker die Komponente verbaut hat muss einerseits an die Planung zurückgemeldet werden und andererseits im Assistenzsystem für folgende Fahrzeuge als temporäre Lösung hinterlegt werden.

Um dieser Problematik im Assistenzsystem Rechnung zu tragen, wurde ein „digitaler Teilespeicher“ konzipiert, der dem Werker neben den eigentlichen Montageschritten angezeigt wird. Dieser enthält alle Positionen, die keinem Montageprozess zugeordnet (gekoppelt) sind. Bemerkt der Werker, dass ihm in einem Montageschritt Komponenten fehlen, so kann er

⁶ Möglicherweise stellt er dabei auch fest, dass die Komponenten nicht in seine Zone gehören und muss sich mit seinen Kollegen in den anderen Zonen bzw. dem zuständigen Planer über einen geeigneten Montageort austauschen.

prüfen, ob diese im Teilespeicher gelistet sind. Wählt er sie an und verbaut sie, so werden sie in der Fahrzeugdokumentation als verbaut markiert und verschwinden aus dem Speicher. Handelt es sich dabei um eine Serienposition, so legt das System eine Kopplung an, damit die Komponenten beim nächsten Fahrzeug direkt im richtigen Montageschritt angezeigt werden und generiert eine Meldung an die Montageplanung. Handelt es sich hingegen um eine Position, die lediglich für die Vorserie relevant ist, speichert das System den Montageschritt und die Sequenznummer des letzten Montageschritts vor dem Verbau der Komponente. Bei nachfolgenden Fahrzeugen wird der Werker dann bei Erreichen der entsprechenden Sequenznummer gefragt, ob er die Komponente verbauen möchte. Somit lernt das System vom Verhalten des Werkers und ergänzt die fehlenden Informationen.

Am Ende der Montage in einer Zone muss der Werker den Teilespeicher bereinigen, sofern dieser noch Positionen enthält. Dazu muss er für jede Position explizit bestätigen, dass diese nicht benötigt wird und nicht verbaut wurde. Entsprechend erfolgt dann eine Meldung an die Produktentwicklung. Natürlich kann mit diesem Vorgehen nicht gänzlich ausgeschlossen werden, dass eine relevante Komponente zunächst nicht an einer geeigneten Stelle im Prozess verbaut und dies erst bei der Bereinigung festgestellt wird, mit der Konsequenz entsprechender Nacharbeit. Jedoch ist sichergestellt, dass der Fehler durch Korrektur der Daten umgehend abgestellt wird und nicht erneut auftreten kann. Um solche Fälle zu vermeiden, wurde auf Wunsch der Anwender zudem eine Funktion integriert, die zu Beginn der Montage warnt falls der anstehende Auftrag ungekoppelte Positionen umfasst und die betreffenden Komponenten auflistet. Der Werker kann dabei optional bereits vor dem Start der Montage den Montageschritt wählen, in dem er die Komponenten verbauen möchte. Insbesondere bei neuen Varianten, die dem Werker noch nicht bekannt sind, konnte die Problematik dadurch entschärft werden.

Da möglicherweise noch nicht für alle Montageschritte Montageorte definiert wurden und die vorgesehene Reihenfolge Fehler aufweisen kann (beispielsweise, wenn die Montage in der angegebenen Reihenfolge geometrisch unmöglich ist), wurde für die Montageschritte analog ein „Prozessspeicher“ vorgesehen. Ist der Werker bei einem angezeigten Montageschritt der Meinung, dass dieser noch nicht an der Reihe ist bzw. zunächst andere Tätigkeiten ausgeführt werden müssten, kann er den Prozessspeicher öffnen, um zu prüfen, ob der gesuchte Schritt mangels Angabe zum Montageort dort hinterlegt wurde. Ist dies der Fall, kann er ihn auswählen, wodurch das System Montageort und Sequenz für folgende Aufträge speichert und eine Meldung an die Planung generiert. Wird der gesuchte Schritt hingegen nicht aufgeführt, kann der Werker eine Übersicht des Montageprozesses einblenden. In dieser werden die für das aktuelle Fahrzeug in der Zone erforderlichen Montageschritte in der vorgesehenen Reihenfolge angezeigt. Wird der vom Werker gesuchte Schritt in der Liste angezeigt, jedoch zu einem späteren Zeitpunkt, handelt es sich um einen Fehler in der Montagereihenfolge bzw. der Abtaktung. Ist der gesuchte Schritt hingegen nicht aufgeführt, kann dies einerseits daran liegen, dass er von der Montageplanung noch nicht angelegt wurde. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass lediglich die Variantenabhängigkeit nicht korrekt hinterlegt wurde bzw. Kopplungen fehlen. Um dies festzustellen, wurde die Möglichkeit vorgesehen, in der beschriebenen Prozessanzeige auch Schritte anzeigen zu lassen, die zwar für das vorliegende Modell und die jeweilige Zone geplant, jedoch aufgrund der Kopplungen nicht für das aktuelle Fahrzeug angezeigt wurden. Konnte er den gesuchten Prozessschritt identifizieren, kann der Werker ihn

an die seiner Meinung nach korrekte Stelle im Ablauf verschieben oder ihn für die sofortige Bearbeitung auswählen. Wird dem Werker hingegen ein Montageschritt angezeigt, der für die vorliegende Variante nicht benötigt wird, kann er diesen auch als nicht relevant markieren. Somit kann der Werker sowohl fehlende bzw. falsche Kopplungen korrigieren wie auch die Montagereihenfolge anpassen. Seine Änderungen werden dabei stets dokumentiert und an die Planung zurückgemeldet.

Die beschriebenen Mechanismen ermöglichen die Anwendung des Assistenzsystems auch bei unvollständigen bzw. inkorrekten Daten und bieten dem Anwender gewisse Möglichkeiten von dem vorgegebenen Prozess abzuweichen. Insbesondere zu Beginn der Prototypenmontage oder nach größeren Änderungen kann diese Vorgehensweise einen gewissen Mehraufwand erzeugen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Stabilisierung der Montageabläufe über mehrere Fahrzeuge letztlich zu einer höheren Montageleistung führt und den Aufwand somit rechtfertigt.

5.3.3 Softwaregeführte Problemklassifizierung und -meldung

Neben den im letzten Abschnitt diskutierten, automatisiert erkennbaren Fehlerarten, für die das System selbstständig Meldungen generiert, können in der Prototypenmontage vielfältigste weitere Probleme auftreten. Möglicherweise erkennt ein Werker in einem Schritt auch Optimierungsmöglichkeiten und möchte seine Verbesserungsvorschläge an die Entwicklung oder Planung übermitteln. Auch in solchen Fällen soll das Assistenzsystem den Werker unterstützen und dazu eine generische Meldungsfunktion bieten. Trotz der großen Vielfalt potenzieller Probleme soll auch bei manuellen Meldungen versucht werden, durch eine geführte Klassifizierung die Problemursache soweit wie möglich einzugrenzen.

Das Ziel des Problemmanagements besteht darin, für ein Problem möglichst schnell eine möglichst optimale Lösung herbeizuführen. Geschwindigkeit in Form kurzer Lösungszeiten ist in der Serienentwicklung essenziell, um erforderliche Änderungen möglichst frühzeitig umsetzen, ihre Auswirkungen eingrenzen und ihre Wirksamkeit hinsichtlich der Problemlösung validieren zu können. Aus dem, im Abschnitt 5.1.5 vorgestellten Modell des Problemlösungsprozesses lassen sich vor diesem Hintergrund einige Anforderungen an die Assistenzfunktionen ableiten.

Der Aufwand für die Erstellung einer Problemmeldung soll minimiert werden, um einerseits Unterbrechungen im Montageablauf zu reduzieren und andererseits die Hemmschwelle für das Melden selbst vermeintlich geringfügiger Defizite zu senken. Die Assistenzfunktionen müssen daher intuitiv und schnell bedienbar gestaltet und Interaktionen auf das notwendigste beschränkt werden. Vollständigkeit und Qualität der Meldungen sollten dabei gleichzeitig maximiert werden, um dem Empfänger der Meldung ein schnelles und umfassendes Problemverständnis zu ermöglichen und Rückfragen zu reduzieren. Eine Meldung sollte daher alle verfügbaren Informationen zu der Montagesituation umfassen, in der das Problem aufgetreten ist. Die Informationen wie die Fahrzeugkonfiguration, der betroffene Montageschritt und die involvierten Komponenten sollten in Form strukturierter Daten bereitgestellt werden, damit auf Empfängerseite falls erforderlich (ggf. unterstützt durch entsprechende Software) eine möglichst präzise Rekonstruktion der Situation möglich ist. Der Meldungsempfänger soll damit in

die Lage versetzt werden, das Problem nachvollziehen zu können, ohne sich selbst in die Montage begeben zu müssen.

Um Verzögerungen im Lösungsprozess zu vermeiden ist es anzustreben, eine Meldung direkt an den zuständigen Lösungsverantwortlichen zu adressieren, anstatt sie mehrfach von einer Stelle zur nächsten weiterleiten zu lassen. Das System sollte den Melder daher bei der Wahl eines Empfängers unterstützen oder die Auswahl direkt automatisieren. Um die Empfänger nicht mit unnötigen Meldungen zu belasten, sollten redundante Meldungen zur gleichen Problematik vermieden bzw. konsolidiert werden. Um den Bearbeitungsstatus nachvollziehen zu können, Transparenz herzustellen und die Motivation zu weiteren Meldungen aufrecht zu erhalten, sollte es den Werkern möglich sein, Informationen zum Status ihrer Meldungen einzusehen. Für den operativen Einsatz muss ein entsprechendes System aber auch praktische Unterstützung bieten, indem temporäre Lösungen vorgeschlagen bzw. situationsspezifisch Vorgehensweisen empfohlen werden. Schließlich sollte es den Nutzern auch ermöglicht werden selbst Lösungsvorschläge festzuhalten und ihr Vorgehen zu dokumentieren.

In der Serienproduktion werden zur Dokumentierung von Montagefehlern und Schäden häufig standardisierte Kataloge verwendet, die Problemart und -lage mit einheitlicher Terminologie beschreiben. Der Fokus liegt bei dieser Anwendung darauf, die Nacharbeit möglichst effizient zu gestalten und statistische Auswertungen zur Fehlerhäufigkeit zu ermöglichen. Eine Ursachenanalyse wird meist erst durchgeführt, wenn bestimmte Fehler gehäuft auftreten. Während der Serienentwicklung besteht die primäre Zielsetzung hingegen darin, Defizite und Unstimmigkeiten im Produktkonzept und den Daten der Entwicklung und Planung zu identifizieren und abzustellen. Die Feststellung der Problemursache ist dabei erforderlich, um entscheiden zu können, ob es sich lediglich um ein operatives Problem mit geringfügigen Auswirkungen handelt oder konzeptionelle Defizite mit potenziell weitreichenden Folgen vorliegen.

Im Rahmen der Untersuchungen zum Praxisdefizit wurde festgestellt, dass sich der überwiegende Teil der auftretenden Probleme bei genauerer Untersuchung auf eine überschaubare Anzahl von Ursachen zurückführen lässt. Dem Werker ist es jedoch meist mangels Informationen und Hintergrundwissen nicht möglich auf die Ursache zu schließen. Aus dieser Erkenntnis wurde der Ansatz abgeleitet, ausgehend von den drei Phasen eines Montageschritts (vgl. Abschnitt 4.2.2) potenzielle Fehlerbilder zu beschreiben und mögliche Ursachen zu identifizieren, in einem Fehlerbaum zu sammeln und diesen zur Implementierung eines Expertensystems für die softwaregeführte Problemklassifizierung bzw. Ursachenvoranalyse einzusetzen. Die im Assistenzsystem vorliegenden Informationen zur Montagesituation in der das Problem aufgetreten ist, können dabei herangezogen werden, um die Fehlerbilder auf Basis ihrer Relevanz für die jeweilige Situation vorzufiltern. So sollten beispielsweise Fehlerbilder, die im Zusammenhang mit einer Verschraubung auftreten können, nur angezeigt werden, wenn der Montageschritt auch eine Verschraubung umfasst.

Tritt ein Problem auf, selektiert der Werker zunächst das Fehlerbild, das seine Situation am besten beschreibt. Kann das gewählte Fehlerbild mehrere im Montageschritt enthaltene Komponenten, Tätigkeiten oder Verbindungen betreffen, bittet das System ihn die betroffenen Elemente auszuwählen, um das Fehlerbild bzw. die Problembeschreibung zu konkretisieren. Falls das so gewählte Fehlerbild durch mehrere Ursachen hervorgerufen werden kann, versucht

das System zunächst auf Basis im Fehlerbaum hinterlegter Entscheidungskriterien und der ihm vorliegenden Daten die zutreffende zu identifizieren. Falls dies nicht automatisiert möglich ist, bittet das System den Werker aus einer Liste von Optionen auszuwählen.

Da Entwicklung und Planung wie auch die Logistik mit IT-Systemen arbeiten ist anzunehmen, dass zu jeder Komponente und jedem Montageschritt Ersteller bzw. Bearbeiter hinterlegt sind. Lässt sich ein Problem daher aufgrund der identifizierten Ursache einer Domäne zuordnen, so kann die Meldung auf Basis der dokumentierten Zuständigkeiten direkt an den hinterlegten Kontakt adressiert werden. Neben der standardisierten, durch den geführten Prozess vorgenommenen Klassifizierung des Problems sowie ggf. einem Kommentar des Werkers und weiteren Anhängen (wie Fotos oder Videos), wird die Meldung durch die im Assistenzsystem vorliegenden Informationen zur Montagesituation, wie z.B. der Fahrzeugkonfiguration, dem betroffenen Montageschritt und den Daten des Werkers angereichert.

Sofern der dokumentierte Sachverhalt operative Auswirkungen verursacht, werden dem Werker nach Abschluss der Meldung vordefinierte Handlungsempfehlungen für seine Situation angeboten, die darauf ausgerichtet sind die Beeinträchtigung der gesamten Montage zu minimieren. Dazu wird die Lagerverfügbarkeit und voraussichtliche Lieferzeit von Komponenten sowie der voraussichtliche Nacharbeitsaufwand berücksichtigt. Prinzipiell wäre es auch denkbar weitere Faktoren wie Abhängigkeiten nachgelagerter Bereiche oder Termine einzubeziehen, darauf wurde jedoch in dieser Arbeit verzichtet.

Um redundante Meldungen desselben Sachverhalts zu vermeiden, wird bei nachfolgenden Fahrzeugen im betroffenen Montageschritt ein Hinweis eingeblendet. Der Werker erkennt damit unmittelbar, dass hier ein bereits bekanntes und gemeldetes Problem vorliegt. Er kann sich dann Details sowie die vorgeschlagene Vorgehensweise anzeigen lassen und das Problem bestätigen. Sollte das Problem nicht mehr auftreten, beispielsweise weil von der Montageplanung die Reihenfolge oder die Arbeitsanweisung angepasst wurde, kann er auch dies dokumentieren und der Planung damit die Wirksamkeit der Lösung zurückmelden.

5.4 Gezielte Absicherung und Reifegradbestimmung

Funktioniert der Problemlösungsprozess wie angestrebt ist davon auszugehen, dass erkannte und gemeldete Probleme effizient gelöst werden und die Anzahl neu gemeldeter Defizite (zumindest für Umfänge, die keinen wesentlichen Änderungen mehr unterliegen) nach einer gewissen Zeit stark abnimmt. Aus der Abwesenheit offensichtlicher Defizite kann zwar die Erfüllung einiger grundlegender Anforderungen, nicht jedoch eine Serienreife abgeleitet werden. Einige serienspezifische Anforderungen erfordern eine gezielte Absicherung.

Wie diese mit dem Assistenzsystem umgesetzt werden kann und wie sich letztlich der Reifegrad bestimmen lässt, wird in diesem Abschnitt dargelegt. Im ersten Schritt wird untersucht, welche Aspekte und Eigenschaften geprüft werden sollten und wie die Bewertung erfolgen kann. Im Anschluss wird erläutert, wie aus den Bewertungen zusammen mit den weiteren, im Assistenzsystem vorliegenden Daten Testabdeckung und Reifegrad ermittelt werden können und wie sich diese darstellen lassen.

Die Prüfung und Absicherung der serienspezifischen Anforderungen soll dabei je Montageschritt erfolgen und beginnen, sobald ein Schritt eine gewisse Grundreife erreicht hat. Diese wird einerseits aus der Anzahl der bereits ausgeführten Wiederholungen des Montageschritts und andererseits aus der Abwesenheit ungelöster Problemmeldungen abgeleitet.

5.4.1 Produktionsbegleitende Prozessbewertung mit einem Montageassistenzsystem

Zunächst ist zu klären, welche Aspekte und Eigenschaften durch die Montagetätigkeit im Prototypenbau bereits als implizit abgesichert betrachtet werden können. Anschließend müssen die Anforderungen ausgewählt werden, die im Umfeld des Prototypenbaus durch die Werker aussagekräftig bewertet werden können. Dabei sind grundlegende Anforderungen, die jeder Montageschritt erfüllen muss und tätigkeitsspezifische Anforderungen, die nur für bestimmte Umfänge relevant sind zu unterscheiden. Letztlich muss auch klar dargestellt werden, welche Merkmale sich mit der Methode im Kontext des Prototypenbaus nicht adäquat bewerten lassen und daher in einem anderen Rahmen abgesichert werden sollten.

Hinsichtlich der produktbezogenen Produktabsicherung kann davon ausgegangen werden, dass die geometrische Konsistenz der Konstruktion, die geometrische Baubarkeit und die Realisierbarkeit sowie Funktion der Verbindungskonzepte gegeben ist. Da Defizite in diesen Bereichen zwingend zu Problemen führen wären sie bereits aufgefallen. Für Themen aus dem Bereich der montagegerechte Produktgestaltung kann dies hingegen nicht erwartet werden, hier ist eine explizite Prüfung erforderlich und im Prototypenbau auch sinnvoll möglich.

Im Bereich der produktbezogenen Prozessabsicherung ist ebenfalls davon auszugehen, dass grundlegende Anforderungen wie die Baubarkeit in der vorgesehenen Montagereihenfolge, die Zugänglichkeit der Montagestellen sowie die Verfügbarkeit anwendbarer Prozessparameter erfüllt sind. Die wertschöpfenden Montageprozesse müssen vollständig definiert sein, jedoch sollten die Tätigkeitsbeschreibungen hinsichtlich ihrer Vollständigkeit und Verständlichkeit geprüft werden. Auch die Plausibilität der Planzeiten sollte explizit betrachtet werden, da die Abtaktung auf diesen Angaben basiert und entsprechend auf realitätsnahe Werte angewiesen ist.

Hinsichtlich der Erfüllung von Anforderungen aus dem Bereich der produktbezogenen Prozessabsicherung können rein auf Basis der Prototypenmontage ohne gezielte Bewertung keine belastbaren Aussagen getroffen werden. Sie bilden zusammen mit der montagegerechten Produktgestaltung daher den Fokus der in dieser Arbeit konzipierten Methode für die produktbegleitende Prozessbewertung.

Defizite in der Planung der sekundären Montagefunktionen und Unterstützungsprozesse sowie der Abtaktung, der Effizienz und der Taktstabilität, haben im Umfeld des Prototypenbaus meist keine oder lediglich geringe Auswirkungen. Auch ergonomische Defizite werden aufgrund der geringen Wiederholungszahl und Frequenz potenziell nicht erkannt. Eine gezielte Bewertung ist daher sinnvoll, um diese aufzudecken, wenngleich sich im nichtseriengleichen Umfeld nicht alle ergonomischen Aspekte und Einflussfaktoren vollständig abbilden und überprüfen lassen. Der Schwerpunkt bei der produktbegleitenden Absicherung soll in diesen

Fällen im Sinne der Früherkennung auf der Identifikation potenziell kritischer Umfänge liegen, um diese in einem anderen Rahmen einer weiteren Prüfung unterziehen zu können. Die Fehlhandlungssicherheit lässt sich aufgrund des starken Produktbezugs und der geringen Abhängigkeit vom Umfeld (abgesehen von der Verwechslungsgefahr bei MMALs) gut im Prototypenbau bewerten. Daher stellt sie ein weiteres Fokusthema in der entwickelten Methode dar.

Da im Prototypenwerk die für die Serie geplanten Betriebsmittel meist noch nicht vollständig verfügbar sind und die Struktur sowie allgemein die Rahmenbedingungen zu unterschiedlich sind, lassen sich Aspekte der Ressourcenabsicherung kaum sinnvoll evaluieren. Es kann hier lediglich geprüft werden, ob benötigte Werkzeuge, Sonderbetriebs- oder Montagehilfsmittel laut Prozessbeschreibung eingeplant sind, ihre Eignung lässt sich mangels Verfügbarkeit in vielen Fällen nicht bewerten. Dieses Themenfeld wurde daher zunächst ausgeklammert.

Zusammenfassend soll der Fokus bei der Methode zur produktionsbegleitenden Prozessbewertung auf folgenden Aspekten liegen:

Montageablauf:

- Vollständigkeit, Korrektheit und Verständlichkeit der Prozessbeschreibungen bzw. Arbeitsanweisungen primärer und sekundärer Montagefunktionen
- Plausibilisierung der Planzeiten
- Abtaktung und Effizienz: Optimierung der Montagereihenfolge zur Vermeidung nicht wertschöpfender Tätigkeiten

Fehlhandlungssicherheit und Montagequalität:

- Das Vergessen von Montagetätigkeiten ist ausgeschlossen
- Es besteht keine Verwechslungsgefahr (ähnliche Bauteile / Varianten)
- Eine falsche Positionierung, Ausrichtung (Spaltmaße, Verzug, Spannungen, Erscheinungsbild), oder Verbindung (Reihenfolge) ist ausgeschlossen
- Die Montage- bzw. Verbindungsstelle ist für den Werker im Prozess einsehbar
- Der Werker ist in der Lage seine Arbeit selbst zu kontrollieren (Werkerselbstkontrolle) und ggf. Fehler zu korrigieren oder zu melden
- Es besteht keine Beschädigungsgefahr (Produkt oder Betriebsmittel). Ggf. sind mitigierende Maßnahmen (Produktschutz, Schutzmaßnahmen an Werkzeugen / Betriebsmittel, organisatorische Maßnahmen wie Arbeitsanweisungen oder Arbeitskleidung) definiert
- Die Einhaltung der definierten Montageabläufe ist sichergestellt und dadurch die Wiederholgenauigkeit gegeben. Für (Sicherheits-) kritische Umfänge sind technische Absicherungsmaßnahmen (z.B. digitale Schraubsysteme, Kamerainspektion) oder manuelle Prüfungen (4-Augen-Prinzip, Qualitätskontrolle) vorgesehen
- Der Umgang mit Ausschuss ist so geregelt, dass ein erneuter Verbau ausgeschlossen ist

Ergonomie und Arbeitssicherheit:

- Identifikation von Montageschritten mit ungünstigen Körperhaltungen, schweren Lasten und hohen Montagekräften
- Identifikation monotoner Belastungen
- Identifikation potenzieller Verletzungsgefahren

Montagegerechte Produktgestaltung⁷:

- Vermeidung montagetechnisch ungünstiger Lösungen
- Reduzierung der Einzelteile, Varianten und konstruktiv bedingter Arbeitsinhalte
- Vermeidung großer oder unhandlicher Bauteile, empfindlicher Materialien und Oberflächen
- Positionierung wartungsrelevanter oder reparaturanfälliger Komponenten an leicht zugänglichen Orten
- konstruktive Fehlhandlungssicherheit (z.B. Codierung von Steckverbindungen)

Um die Objektivität der Bewertung zu steigern und den Bewertungsaufwand zu reduzieren, ist es naheliegend eine automatisierte Bewertung mittels Sensorik anzustreben. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden dazu einige Konzepte zur Ergonomiebewertung und Wegeoptimierung mittels *motion-capturing* Technologie und Kraftmesssensorik erprobt. Die getesteten Lösungen haben sich jedoch nicht als ausreichend praxistauglich für einen umfassenden, dauerhaften Einsatz in der regulären Prototypenmontage erwiesen, weshalb dieser Ansatz nicht weiterverfolgt wurde. Lediglich für die Bewertung der Planzeit wurde eine automatisierte Bewertung konzipiert. Durch die Quittierung der Montageschritte sind die tatsächlichen Ausführungszeiten im Assistenzsystem bekannt. Diese werden mit den vorgesehenen Planzeiten verglichen. Unter Berücksichtigung des Trainingsgrads in Form der bereits durchgeführten Wiederholungen und prognostizierter Trainingseffekte wird anschließend auf Basis einer Heuristik bewertet, ob die Planzeit plausibel scheint. Um dem Werker im Montageablauf die für eine Aufgabe verfügbare Zeit zu veranschaulichen und den Zeitdruck der Serienmontage zu simulieren, wurde eine Visualisierung mittels eines ablaufenden Zeitbalkens implementiert.

Zur Bewertung der restlichen ausgewählten Themenbereiche wurde ein Fragenkatalog entwickelt. **Tabelle 12** zeigt beispielhaft fünf der insgesamt 30 Fragen, die im Laufe der Arbeit zusammengetragen wurden. Alle Fragen wurden dabei in einfacher Sprache möglichst konkret und eindeutig als Entscheidungsfragen formuliert, die der Bewerter mit ja bzw. erfüllt oder nein bzw. nicht erfüllt beantworten oder als nicht relevant für den betrachteten Umfang kennzeichnen kann. Zusätzlich kann der Werker einen Kommentar als Freitext zur Begründung seiner Bewertung hinterlegen. Dieser Fragenkatalog stellt lediglich einen Ausgangspunkt dar und soll entsprechend der Erfahrungen bei der praktischen Anwendung weiterentwickelt werden.

⁷ Wenngleich es sich bei der Betrachtung der montagegerechten Produktgestaltung mehr um eine Bewertung des Produkts als der Montageprozesse handelt, sollen die Aspekte dieser Kategorie aufgrund ihrer Auswirkungen auf die Montage im Rahmen der Prozessbewertung geprüft werden.

| Kategorie | Frage | Relevanzkriterien | Priorität (1-10) |
|---|--|---------------------------|------------------|
| Montageablauf | Sind alle im aktuellen Montageschritt notwendigen Tätigkeiten vollständig, korrekt und Verständlich beschrieben? | Keine (immer relevant) | 10 |
| Montageablauf | Können Zusatzfähigkeiten durch eine Änderung der Montagereihenfolge reduziert werden? | Keine (immer relevant) | 5 |
| Fehlhandlungssicherheit und Montagequalität | Ist eine Verwechslung beim Aufnehmen der Komponenten ausgeschlossen? | Montagekopplung vorhanden | 7 |
| Montagegerechte Produktgestaltung | Ist eine falsche Positionierung oder Ausrichtung der Komponenten ausgeschlossen? | Montagekopplung vorhanden | 7 |
| Montagegerechte Produktgestaltung | Ist die Steckverbindung eindeutig codiert, d.h. existiert im Arbeitsraum lediglich ein Gegenstück mit der passenden Codierung? | Steckverbindung gekoppelt | 7 |

Tabelle 12: Auszug aus dem Fragenkatalog für die gezielte Absicherung von Montageprozessen

Fragen, die bestimmte Tätigkeiten wie beispielsweise das Aufnehmen und Positionieren eines Bauteils, eine Verschraubung oder das Herstellen einer elektrischen Steckverbindung betreffen oder sich auf Werkzeuge bzw. sonstige Ressourcen beziehen, sollen möglichst nur in Montageschritten abgefragt werden, für die sie tatsächlich relevant sind. Dazu wurden im Fragenkatalog je Frage entsprechende Relevanzkriterien definiert, die das Assistenzsystem interpretieren und prüfen kann. An einigen Stellen war es dazu auch erforderlich, das Modell der Montageprozessdaten um zusätzliche Attribute zu erweitern, beispielsweise um explizit zu kennzeichnen, dass ein Montageschritt eine Steckverbindung umfasst. Etwa die Hälfte der Fragen wurden auf diese Weise mit Kriterien versehen.

Um zu entscheiden, bei welchem Fahrzeug eine Frage zu einem bestimmten Montageschritt gestellt werden soll, prüft das Assistenzsystem zyklisch das hinterlegte Produktionsprogramm mittels einer Heuristik. Grundsätzlich werden dabei eine frühestmögliche Erstbewertung und mindestens eine zweifache Bestätigung angestrebt, wobei die zweite mit seriennahen Versuchsteilen oder Serienteilen erfolgen soll. Jeder für einen Montageschritt relevante Aspekt muss damit mindestens drei Mal während der Prototypenphase geprüft werden. Wird die angestrebte aggregierte Konfidenz damit nicht erreicht, kann auch mehrmals geprüft werden. Umfänge, welche nur mit geringer Häufigkeit auftreten werden bei der Planung entsprechend priorisiert.

Um eine übermäßige Verzögerung der Montage eines Fahrzeugs auszuschließen und die Akzeptanz durch die Werker nicht zu gefährden, wurde festgelegt, dass je Montageschritt maximal zwei Fragen und je Zone maximal 20 Fragen gestellt werden sollen. Diese Parameter wurden zunächst beliebig gewählt, haben sich in der Praxis für das vorliegende Umfeld jedoch

als grundsätzlich geeignet erwiesen. Entsprechend der Rahmenbedingungen wie Anzahl und Konfiguration der Prototypen und Arbeitsumfänge in einer Zone sollten sie an das jeweilige Umfeld angepasst werden, um ein Optimum zwischen erreichbarem Absicherungsgrad und zusätzlicher Belastung der Werker zu erreichen. Innerhalb dieser Rahmenbedingungen wird die Reihenfolge über eine, den Fragen zugewiesene Priorität und einen zufälligen Faktor bestimmt.

Im Abschnitt 5.1.6 wurde erläutert, dass die Konfidenz als Maß für die Aussagekraft einer Bewertung im Kontext einer übergreifenden Absicherungsstrategie aus der verwendeten Bewertungsmethode, dem Bewertungsumfeld sowie dem Bewertungsgegenstand abgeleitet werden soll. Dies lässt sich realisieren, in dem für die Optionen der genannten Kategorien jeweils Faktoren zwischen null und eins definiert werden, die miteinander multipliziert werden. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Faktoren, die auf Basis zahlreicher Expertengespräche und Workshops definiert wurden, sind in **Tabelle 13** gelistet.

| Merkmale | Ausprägung | Faktor |
|------------|---|--------|
| Methode | Messung / Simulation | 1,0 |
| | gemeinschaftliche Beurteilung durch mindestens 3 Experten | 0,8 |
| | subjektive Beurteilung durch Einzelperson | 0,5 |
| Umfeld | Virtuell | 0,5 |
| | Labor | 0,5 |
| | Werkstatt / Prototypenbau / Nacharbeitsplatz | 0,8 |
| | Seriengleich / Serie | 1,0 |
| Gegenstand | 3D Modell | 0,5 |
| | Versuchsteile aus Ersatzmaterialien | 0,5 |
| | Seriennahe Versuchsteile | 0,8 |
| | Serienteile | 1,0 |

Tabelle 13: Faktoren zur Ermittlung der Konfidenz einer Einzelbewertung

Dieses Modell stellt zunächst eine sehr oberflächliche Betrachtung dar, lässt sich jedoch beliebig durch weitere Merkmale und Ausprägungen erweitern. Beispielsweise könnten für verschiedene Simulationsmethoden bei der virtuellen Absicherung individuelle Faktoren definiert werden. Es wäre auch denkbar, je abzusichernder Eigenschaft bzw. Anforderung individuelle Faktoren zu definieren, was die Komplexität jedoch drastisch steigern würde.

Da es sich bei der konzipierten produktionsbegleitenden Absicherung stets um eine subjektive Beurteilung durch eine Einzelperson im Umfeld des Prototypenbaus handelt, hängt die Konfidenz nach dem vorgeschlagenen Modell lediglich vom Bewertungsgegenstand also den Bauteilen ab. Dabei sollte immer der niedrigste in einer Variantenkombination anzutreffende Faktor herangezogen werden. Umfasst ein Montageschritt beispielsweise die Verschraubung eines

mittels additiver Fertigung zur Validierung eines neuen Produktkonzepts hergestellten Halters (Versuchsteil aus Ersatzmaterialien) mit einer Schraube (Serienteil) an eine Verkleidung (Seriennahes Versuchsteil), so ist für den Betrachtungsgegenstand der Faktor 0,5 anzusetzen. In diesem Beispiel ergibt sich für die subjektive Beurteilung durch den Werker in der Prototypenmontage eine Konfidenz von 0,2.

Um die Ergebnisse mehrere Einzelbewertungen zu einer Gesamtbewertung einer Eigenschaft für einen Montageschritt zu aggregieren, wird die Summe über die Produkte aus Bewertungsergebnis (+1 für erfüllt, -1 für nicht erfüllt, 0 für nicht relevant) und Konfidenz gebildet:

$$e = \sum_{i=1}^{n_b} (e_{b_i} \times k_{b_i})$$

| | |
|-----------|--|
| e | aggregiertes Bewertungsergebnis |
| n_b | Zahl der Einzelbewertungen |
| e_{b_i} | Bewertungsergebnis der Einzelbewertung $i \in \{-1, 0, +1\}$ |
| k_{b_i} | Konfidenz der Einzelbewertung i |

Die Konfidenz der aggregierten Bewertung wird durch Aufsummieren der Konfidenzen der Einzelbewertungen bestimmt. Dabei wurden Obergrenzen bei Nichterfüllung bestimmter Anforderungen festgelegt. So kann beispielsweise sichergestellt werden, dass eine Mindestanzahl von drei Bewertungen durchgeführt wird, wovon mindestens eine im physischen Umfeld anhand seriennaher Versuchsteilen erfolgt.

5.4.2 Bestimmung und Darstellung des Absicherungsstands

Wie im Abschnitt 4.1 beschrieben, gestaltet sich die Messung des Reifegrads in einem Entwicklungsprojekt schwierig. Jeder Entwicklungsstand weist eine gewisse Reife auf, egal ob eine Absicherung der angestrebten Eigenschaften erfolgt oder nicht. Jedoch können nur dann zuverlässige Aussagen bzgl. der Reife getroffen und Risiken vermieden werden, wenn eine systematische Absicherung vorgenommen wird. In diesem Sinne kann der Absicherungsstand als Maß für die (gesicherte) Reife eines Entwicklungsprojekts betrachtet werden. Der Absicherungsstand lässt sich wiederum aus der Testabdeckung und den Absicherungsergebnissen ableiten.

Zur Bestimmung der Testabdeckung sollen zunächst vereinfachend zwei Dimensionen, die Montageschritte und die zu bewertenden Kriterien, betrachtet werden. Bereits aus dieser Kombination ergibt sich in der Praxis eine hohe Zahl an erforderlichen Bewertungen. Zudem müssen die, in Abschnitt 4.2 gesammelten, absicherungsrelevanten Aspekte und Eigenschaften für eine aussagekräftige Bewertung weiter heruntergebrochen und detailliert werden.

Im vorhergehenden Abschnitt wurde diskutiert, welche Anforderungen aufgrund der Montagefähigkeit bereits als implizit abgesichert gewertet werden können. Des Weiteren wurden Fokusthemen für die gezielte Bewertung ausgewählt und 30 Fragestellungen zu diesen formuliert. Geht man in einer Zone wie der Cockpitvormontage von etwa 150 Montageschritten aus, ergeben sich damit bereits bei einmaliger Betrachtung im ungünstigsten Fall 4.500 durchzuführende Bewertungen. Jedoch müssen nicht alle Montageschritte hinsichtlich aller Aspekte bewertet werden. Im letzten Abschnitt wurde bereits beschrieben, wie das Assistenzsystem anhand von Relevanzkriterien entscheiden kann, welche Prüfungen im jeweiligen

Montageschritt erforderlich sind. Die Bewertung erfolgt bei einem typischen Projekt zwar über mehrere Monate und hunderte Prototypen hinweg. Es wird jedoch deutlich, dass die Absicherungstätigkeit in dieser Form einen relevanten Arbeitsteil in der Prototypenmontage darstellen wird. Diesem muss die, durch das Assistenzsystem erreichbare, Effizienzsteigerung in der Montage sowie der Aufwand für die entfallenden Absicherungsworkshops gegenübergestellt werden.

Neben den Bewertungsergebnissen sollte bei der Darstellung der Testabdeckung deutlich werden, welche Aspekte, Varianten und Revisionen noch nicht abgesichert wurden, jedoch für eine Prüfung vorgesehen sind. Idealerweise sollte auch Transparent gemacht werden, wo Lücken bestehen, weil eine Absicherung mit dem geplanten Produktionsprogramm nicht durchgeführt werden kann (beispielsweise können die Montageabläufe im Bereich des Panoramadachs nicht geprüft werden, wenn kein Prototyp mit der entsprechenden Sonderausstattung geplant ist). **Abbildung 54** illustriert, wie der Stand der Absicherung nach diesem vereinfachten Modell dargestellt werden könnte.

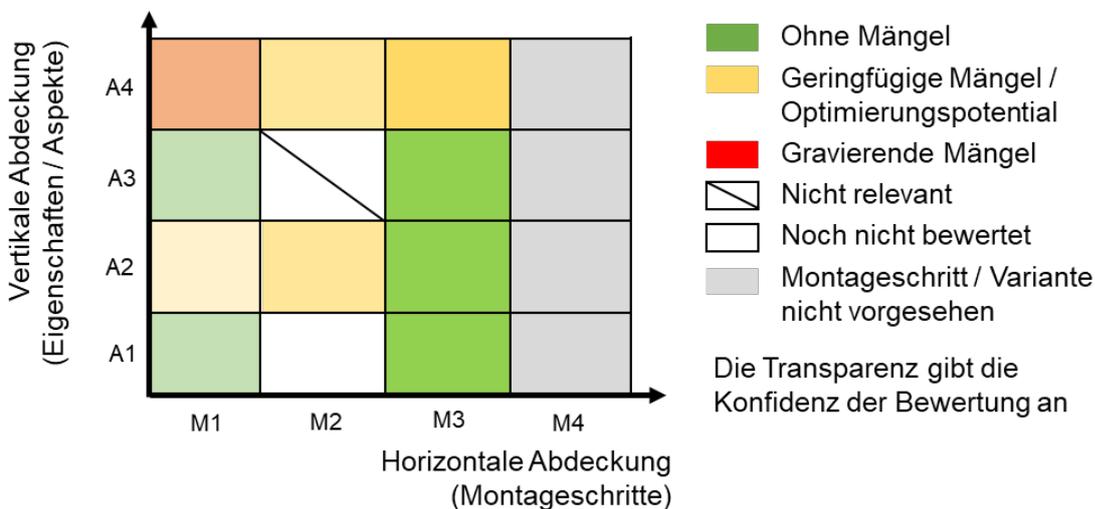


Abbildung 54: Visualisierung des Absicherungsstands nach dem vereinfachten Modell

Die Betrachtung eines gesamten Fahrzeugprojekts in dieser Form ist aufgrund der hohen Zahl der Montageschritte wenig sinnvoll. Zur Steigerung der Übersichtlichkeit sollte der Betrachtungsbereich daher eingeschränkt werden, beispielsweise auf bestimmte Montagebereiche oder anhand der Zuständigkeiten der Planer. Um dennoch auch auf Ebene des gesamten Projekts eine Aussage treffen zu können, sind neben der graphischen Darstellung diverse Kennzahlen denkbar, beispielsweise die bereits in Abschnitt 5.1.6 definierte Bewertungs- und Absicherungsquote. Auch könnten die Zahl offener Probleme und als mangelhaft bewerteter Umfänge als Metrik für die Planungs- bzw. Entwicklungsleistung in bestimmten Bereichen herangezogen werden. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass auch bei der aggregierten Repräsentation durch Kennzahlen Lücken in der Absicherung nicht verschleiert werden.

Wie in Abschnitt 5.1.6 beschrieben, sind im Hinblick auf eine möglichst vollständige Absicherung aller Produktvarianten, einschließlich der Änderungen an Produkt und Montageprozessen, zwei weitere Faktoren zu berücksichtigen. Durch die Betrachtung aller Varianten-

kombinationen steigt die Menge der zu bewertenden Szenarien, also die horizontale Ausdehnung. Zur Abbildung der zeitlichen Veränderlichkeit müsste das Modell um eine weitere Dimension ergänzt werden, was eine übersichtliche Darstellung erschwert. Werden jeweils nur die aktuellsten Bewertungsergebnisse dargestellt und falls sich diese nicht auf die aktuellste Revision beziehen mit einer Markierung versehen, so lässt sich dennoch eine zweidimensionale Darstellung realisieren, wie in **Abbildung 55** gezeigt. Historische Bewertungen alter Planstände sollten jedoch vorgehalten werden und bei Bedarf für eine gezielte Analyse verfügbar sein. Aspekte, die für unterschiedliche Variantenkombinationen nicht getrennt bewertet werden müssen, können zusammengefasst werden.

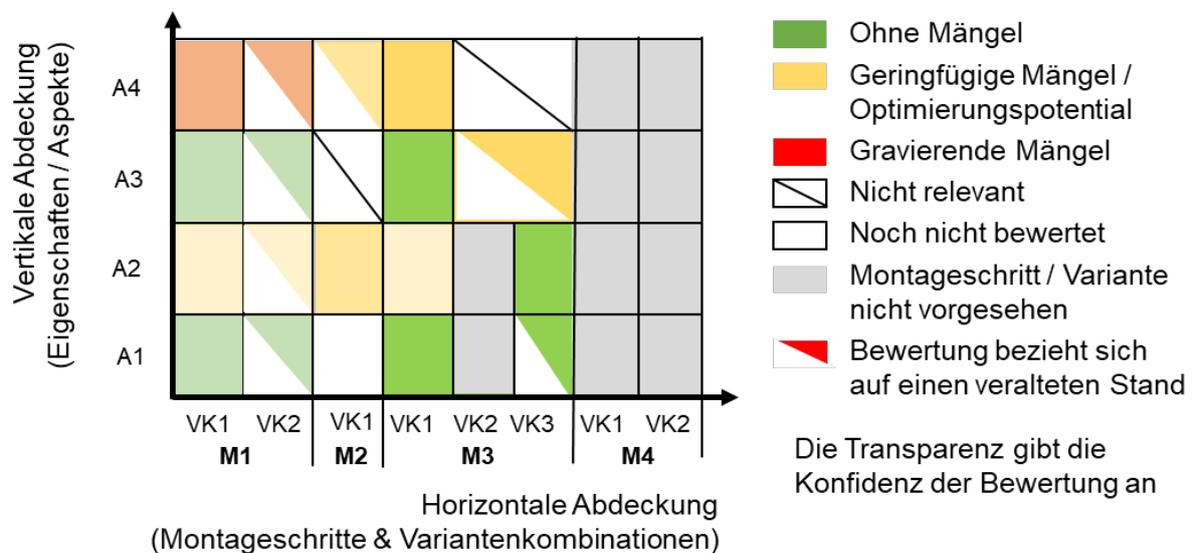


Abbildung 55: Erweiterte Visualisierung des Absicherungsstands

Bei diesem Ansatz besteht die erste Herausforderung darin, die horizontale Ausdehnung, also alle in einem Montageschritt möglicherweise anzutreffenden Variantenkombinationen zu bestimmen. Dies stellt zwar einen gewissen (Berechnungs-) Aufwand dar, kann jedoch auf Basis der Produktstrukturdaten und der Kombinations- bzw. Ausschlussregeln automatisiert erfolgen. Die Komplexität dieser Aufgabe entsteht primär durch die Bestimmung der je Montageschritt möglichen Ausgangssituationen.

Um die Anzahl der geforderten Bewertungen und die Komplexität nicht unnötig aufzublähen, müssen zwei weitere Herausforderungen gelöst werden. Die erste besteht darin, die für eine Bewertung aus Sicht der Montage zu unterscheidenden Variantenkombinationen zu identifizieren. Dabei ist auch zu prüfen, hinsichtlich welcher Aspekte eine separate Bewertung erforderlich ist, bzw. welche Bewertungen anderer Varianten übernommen werden können. Die zweite liegt darin, bei Änderungen an Produkt oder Prozessen zu bewerten, hinsichtlich welcher Aspekte eine erneute Bewertung erforderlich ist, bzw. welche Bewertungen übernommen werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte für die erste Fragestellung keine zufriedenstellende automatisierte Lösung gefunden werden. Zunächst wurde mit Simulationen des Bauraums experimentiert, um automatisiert Kombinationen mit relevanten geometrischen Unterschieden zu

identifizieren. Jedoch konnten damit nicht die erwünschten Ergebnisse erzielt werden. Zudem wären mit diesem Ansatz keine Aussagen bzgl. der Unterschiede im Materialverhalten möglich gewesen. Daraufhin wurde als Minimallösung eine Abfrage konzipiert, bei der der Werker im Rahmen einer Bewertung auf andere, bereits bewertete Varianten hingewiesen und gefragt wird, ob er die Bewertung für die vorliegende Variante übernehmen möchte.

Hinsichtlich der Änderungen wurden zunächst Produkt- und Prozessänderungen unterschieden. Anschließend wurde jeweils untersucht, wie der Änderungsumfang automatisiert bewertet werden kann. Für Änderungen am Produkt wurde dazu eine Heuristik entworfen, um die Produktstrukturdaten laufend zu prüfen. Dazu werden die Zeichnungsindizes (Änderungen dieser bedeuten eine geringfügige Änderung eines Bauteils) sowie die Änderungsindizes (Hinweis auf eine umfassendere Änderung an einer Komponente) aller Komponenten einer Baugruppe auf Aktualisierungen überwacht. Auch die Anzahl der geänderten Komponenten sowie die Entfernung oder Neuerstellung von Positionen fließt in die Bewertung mit ein. Als Ergebnis ist jede Baugruppe in eine der Kategorien „unverändert“, „geringfügige Änderungen“, „signifikante Änderungen“, oder „Konzeptänderung“ eingeteilt.

Um Änderungen an den geplanten Montageabläufen zu erkennen, wurde lediglich auf den Revisionsindex der Montageschritte zurückgegriffen, der durch die eingesetzte Montageplanungs-Software bei gewissen Änderungen automatisch erhöht wird. Die damit realisierbare Änderungserkennung hat sich jedoch in der Praxis als zu empfindlich herausgestellt.

Abschließend wurde der Fragenkatalog für die gezielte Absicherung um Attribute erweitert, die angeben, ab welchem Änderungsumfang eine Neubewertung erforderlich ist. Beispielsweise sollte die Positionierung bzw. Ausrichtung bereits bei geringfügigen Produktänderungen überprüft werden, wohingegen eine Neubewertung der Fehlhandlungssicherheit hinsichtlich der Verwechslung von Komponenten erst bei einer Konzeptänderung erforderlich ist.

6 Realisierung eines Assistenzsystems für die Prototypenmontage

In den letzten beiden Kapiteln wurde eine Methode zur Anwendung und Absicherung geplanter Serienmontageprozesse in der Prototypenmontage mithilfe eines Montageassistenzsystems erarbeitet und ein Konzept für ein entsprechendes Assistenzsystem entworfen. Um Methode und Konzepte evaluieren zu können, wurde im Rahmen der Forschungstätigkeit zu dieser Arbeit ein entsprechendes Assistenzsystem entwickelt und prototypisch implementiert. In diesem Kapitel werden Zielsetzung, Vorgehensweise, Verlauf und Ergebnis dieser Entwicklung vorgestellt.

6.1 Zielsetzung und Anforderungen

Das Ziel der hier beschriebenen Entwicklung besteht nicht in der Bereitstellung einer, in der industriellen Praxis direkt produktiv einsetzbaren Lösung. Vielmehr sollen Fragestellungen bezüglich der Gestaltung diskutiert und Lösungsansätze vorgestellt, ausgewählt und zu einer Gesamtlösung kombiniert werden, um die generelle Realisierbarkeit eines Montageassistenzsystems für den Prototypenbau zu demonstrieren.

Im Sinne der zweiten, in der DSR-Methodik definierten Forschungsaktivität der Validierung („*Evaluate*“), soll das Ergebnis dabei jedoch zumindest die Durchführung einer ersten Studie in einer realen Montageumgebung ermöglichen, um die Tauglichkeit der Methode und die Leistungsfähigkeit der Assistenzfunktionen fundiert bewerten zu können.

Im Folgenden werden die Anforderungen an die Assistenzfunktionen, die im vorhergehenden Kapitel bereits ausführlich diskutiert wurden, noch einmal stichpunktartig zusammengefasst. Anschließend werden noch allgemeine, nicht-funktionale Anforderungen vorgestellt, die zur Erreichung der oben formulierten Zielsetzung berücksichtigt werden müssen.

Grundlegende Montageassistenzfunktionen

Die grundlegende Funktionalität des Assistenzsystems soll es ermöglichen, die Prototypenfahrzeuge entsprechend der, für die Serienproduktion geplanten Abläufen zu montieren. Die Verteilung der Arbeitsinhalte muss dazu an das Montageumfeld des Prototypenwerks angepasst werden. Am Arbeitsplatz muss den Mitarbeitern der jeweils auszuführende Arbeitsschritt klar verständlich angezeigt werden, wobei neben einer textuellen Beschreibung eine graphische Darstellung zu realisieren ist. Der Montagefortschritt soll durch das System möglichst detailliert beobachtet und dokumentiert werden.

- 1) Das System muss in der Lage sein, aus den Daten der Produktentwicklung und Montageplanung automatisch fahrzeugspezifische Montageabläufe für die Vorserienumgebung zu erzeugen.
- 2) Dies schließt eine Visualisierung der Komponenten und Montagesituationen ein.

- 3) Die zur Nutzung des Systems notwendige Interaktion soll auf ein Minimum beschränkt werden.
- 4) Das System soll den physischen Prozess durch Sensorik und angebundene Betriebsmittel überwachen können, um Informationen situationsbezogen anzuzeigen, die Interaktion zwischen Nutzer und System zu minimieren und Fehlhandlungen zu erkennen.
- 5) Das System soll angebundene Betriebsmittel ansteuern können, um die korrekte Verwendung von Komponenten und Prozessparametern sicherzustellen und den Arbeitsablauf zu beschleunigen.
- 6) Während der Montage soll das System umfassende Daten zum Ablauf und Fortschritt sammeln und speichern, um die Transparenz zu steigern, Analysen zu ermöglichen und andere Formen der Dokumentation zu ersetzen.

Umgang mit Defiziten und Problem-Management

Aufgrund der andauernden Serienentwicklung sind sowohl in Produkt als auch in Prozessen Unzulänglichkeiten zu erwarten. Daher ist die in Abschnitt 5.3 beschriebene Funktionalität zu implementieren.

- 7) Es ist Funktionalität zu integrieren, die es erlaubt sowohl operative wie auch konzeptionelle Probleme, die während der Prototypenmontage auftreten oder entdeckt werden, zu dokumentieren. Das System soll den Anwender bei der Klassifizierung und Beschreibung unterstützen und den Aufwand für eine Meldung minimieren. Durch Anreicherung der Meldung um den Kontext der Montagesituation soll der Informationsgehalt der Meldung maximiert werden.
- 8) Das System soll auf Basis der Klassifizierung selbstständig den Adressaten einer Problemmeldung identifizieren und sie entsprechend zustellen.
- 9) Da mit fehlerhaften Datenständen zu rechnen ist, muss es den Nutzern möglich sein unter Angabe einer Begründung vorsätzlich von den Vorgaben abzuweichen. Dies ist entsprechend vom System zu dokumentieren. Folgende Abweichungen sind zu ermöglichen:
 - a. Komponenten aus der Stückliste nicht zu verbauen
 - b. Andere Komponenten, insb. andere Entwicklungsstände zu verbauen als in der Stückliste angegeben
 - c. Zusätzliche, nicht in der Stückliste vorgesehene Komponenten zu verbauen
 - d. Angepasste Prozessparameter zu verwenden
 - e. Die Sequenz der Arbeitsschritte anzupassen

Bewertung von Reife und –Qualität

- 10) Das System soll über Funktionalität verfügen, die den in Abschnitt 5.4.1 vorgestellten Fragenkatalog zur gezielten Absicherung anwendet, um den Werker im Montageablauf zur Bewertung aufzufordern. Um die Belastung der Werker zu minimieren, sollen die Fragen möglichst gleichmäßig auf das Produktionsprogramm verteilt und gleichzeitig die Testabdeckung maximiert werden.
- 11) Auf Basis der im System vorliegenden Informationen zu den bereits montierten Fahrzeugen, den gemeldeten Problemen und der gezielten Prozessbewertung sollen nach der, in Abschnitt 5.4.2 beschriebenen Methode Informationen zur erreichten Testabdeckung und dem Reifegrad bestimmt und dargestellt werden.

Allgemeine und nicht-funktionale Anforderungen

Neben den funktionalen Aspekten sind weiterhin einige Anforderungen hinsichtlich der Qualität der Funktionalität sowie allgemeine Anforderungen an Art und Gestalt des Systems zu berücksichtigen:

- 12) Die Benutzeroberfläche der Anwendung muss intuitiv und leicht verständlich gestaltet sein, um den Aufwand für Schulung und Training zu minimieren sowie die Akzeptanz bei den Anwendern zu erhöhen.
- 13) Das System muss eine adäquate Leistung im Sinne tolerierbarer Reaktionszeiten aufweisen. Latenzen des Systems dürfen die Arbeit in der Montage nicht beeinträchtigen.
- 14) Das System muss eine, für den Pilotbetrieb ausreichende Stabilität aufweisen und die Konsistenz muss gewährleistet sein. Insbesondere muss der Montageprozess jederzeit unterbrochen bzw. pausiert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgenommen werden können.
- 15) Die Entwicklung soll möglichst plattform- und herstellerunabhängig sein, freie bzw. quelloffene Software und Standards sind zu bevorzugen.
- 16) Da im Prototypenumfeld sensible Informationen verarbeitet werden, soll das System nur einem autorisierten Personenkreis zugänglich sein, seine Nutzer stets identifizieren und Vertraulichkeit sowie Integrität der Daten adäquat schützen.

6.2 Technische Konzeption

Im folgenden Abschnitt wird die Entwicklung und der technische Aufbau des Assistenzsystems beschrieben. Ausgehend von der Organisation des Projekts wird die Architektur, der geplante Arbeitsablauf und die Applikationslogik sowie das Datenmodell diskutiert. Die Implementierung und das Entwicklungsergebnis werden dann im letzten Abschnitt des Kapitels präsentiert.

6.2.1 Rahmenbedingungen und Vorgehensweise

Auf Basis der gesammelten Anforderungen und einer Recherche zu den technischen Optionen wurden zunächst einige grundlegende Designentscheidungen getroffen, Entwurfsmuster und Frameworks gewählt und die Applikationsarchitektur skizziert. Anschließend folgte die Ausarbeitung der Applikationslogik und der Arbeitsabläufe sowie darauf aufbauend die Entwicklung eines fachlichen Datenmodells.

Die Implementierung und Validierung erfolgte anschließend über einen Zeitraum von etwa zwei Jahren im Rahmen eines Forschungsprojekts in Zusammenarbeit mit der BMW Group am Standort München. Das Projekt wurde nach den Prinzipien und Methoden der agilen Softwareentwicklung organisiert und mit einem Team von bis zu fünf Studenten durchgeführt. Sobald die wesentlichen Bestandteile mit ihren Grundfunktionen verfügbar waren, wurde begonnen das System zunächst in einem Laborumfeld und später an einem Arbeitsplatz der Prototypenmontage zu testen, um in einem iterativen Prozess laufend die Entwicklungsergebnisse zu überprüfen, die Anforderungen zu detaillieren und die Schwerpunkte für den nächsten Entwicklungszyklus zu bestimmen. Die Erprobung und Bewertung sowie die Definition der Entwicklungsziele erfolgte dabei mit bzw. durch die potenziellen Anwender sowie die Experten der Montageplanung, des Prototypenwerks und der Serienmontage. Während die ersten Tests noch mit einfachen, selbst erzeugten Datensätzen fiktiver Produkte und Prozesse durchgeführt wurden, konnten bereits nach etwa einem halben Jahr Entwicklung Daten und Prozesse eines echten Fahrzeugprojekts in einer realitätsnahen Testumgebung verwendet werden. Parallel zu der Entwicklung des Assistenzsystems wurden Schnittstellen zu den Systemen der Produktentwicklung, Logistik und Montageplanung geschaffen und letztere dazu befähigt, die Daten in der erforderlichen Art und Weise zu liefern. Für die Erprobung unter realen Bedingungen wurde schließlich ein produktiver Arbeitsplatz der Prototypenmontage mit dem System ausgestattet und die in Kapitel 7 beschriebene Studie durchgeführt.

6.2.2 Entwurfsmuster und Systemarchitektur

Die Konzeption der Applikation erfolgte nach dem Prinzip des „*Domain-driven Designs*“ (DDD), das fachliche Zusammenhänge in den Vordergrund stellt und sich auf eine umfassende Modellierung einer Domäne stützt. Die in den Kapiteln 2 bis 5 beschriebene Vorarbeit diente entsprechend dazu das nötige Verständnis der Domäne, ihrer Zusammenhänge und Abläufe zu gewinnen. Auf Basis des Domänenwissens, unter Einbindung von Montageexperten und vor dem Hintergrund der im Abschnitt 6.1 analysierten Anforderungen wurden die Arbeitsabläufe und das fachliche Datenmodell entwickelt. Zunächst wurden jedoch einige grundlegende Designentscheidungen getroffen, diese werden im Folgenden erläutert.

Realisierung als Webanwendung im Client-Server Modell

Die Vielzahl an modernen, quelloffenen Frameworks für die Webentwicklung ermöglichen die schnelle Umsetzung leistungsfähiger, modularer und skalierbarer Lösungen. Aus diesem Grund und um Flexibilität bei der Auswahl der Endgeräte zu gewährleisten bzw. eine Bindung an eine bestimmte Plattform zu vermeiden, wurde das System nach dem Client-Server-Modell als Single-Page-Webanwendung konzipiert. Damit ist es prinzipiell mit jedem Endgerät verwendbar, das über einen aktuellen Web-Browser verfügt.

Webanwendungen werden nicht lokal auf einem Computer installiert, stattdessen wird der auf dem Endgerät benötigte Programmcode beim Aufruf der Applikation im Browser von einem Webserver geladen und durch den Browser ausgeführt. Bei komplexeren Anwendungen, die nicht rein auf der Seite des Endgeräts realisiert werden können, bieten serverseitige Komponenten Dienste zur Datenbereitstellung und -verarbeitung an. Diese können zur Laufzeit vom clientseitigen Programmteil aufgerufen werden. Bei klassischen Webanwendungen wird die Applikationslogik fast ausschließlich serverseitig realisiert, der Client stellt lediglich die gelieferte Webseite dar und ermöglicht eine Eingabe. Die Kommunikation wird bei derartigen Anwendungen immer vom Client aus initiiert, der Server verarbeitet die Anfrage, liefert eine neue Webseite zurück und der Client aktualisiert seine Anzeige vollständig. Dies limitiert die auf der Seite des Clients realisierbaren Funktionen und führt durch das vollständige Aktualisieren der Anzeige bei jeder Transaktion zu einer hohen Netzwerklast und schlechter Nutzererfahrung durch lange Ladezeiten.

Um diese Nachteile zu überwinden, wird bei moderneren *Single-Page-Webanwendungen* (SPA) mehr Logik und Funktionalität zur Seite des Clients verlagert. Dazu wird beim initialen Aufruf der Applikation umfangreicherer Code vom Server zum Client übertragen und von diesem ausgeführt. Dieser ermöglicht es dann, dass die clientseitige Anzeige auch nur in Teilen (anstatt immer vollständig) aktualisiert wird, wodurch die jeweils zu übertragende Datenmenge drastisch reduziert und die Ladezeiten verkürzt werden. Zudem ermöglichen neue Technologien auch eine bidirektionale Kommunikation zwischen Client und Server, wodurch ein Server bei einem Ereignis direkt Daten an den Client senden kann, ohne auf die nächste Anfrage des Clients warten zu müssen. Eine performante und stabile Netzwerkverbindung zwischen Client und Server stellt eine Grundvoraussetzung für den Einsatz von SPAs dar.

Im Produktionsumfeld und insbesondere der Steuerungstechnik sind Web-basierte Applikationen aktuell noch eher selten anzutreffen. Aufgrund der oftmals kritischen Anforderungen hinsichtlich Echtzeitfähigkeit und Verfügbarkeit oder spezieller Hardware dominieren in vielen Bereichen nach wie vor native Anwendungen. Die zugrundeliegenden Technologien entwickeln sich jedoch aufgrund der breiten Anwendung im Internet stetig und mit hoher Geschwindigkeit weiter. Wie das entwickelte System demonstriert, sind moderne Webanwendungen für den betrachteten Anwendungsbereich durchaus geeignet.

Modularität

Auf Systemebene soll beim DDD durch Abgrenzung von thematischen und funktionalen Bereichen und definierte Schnittstellen die Komplexität beherrschbar und Wechselwirkungen reduziert werden. Beim Entwurf der Systemarchitektur und der Ausarbeitung der Applikationslogik wurde daher auf eine klare Definition von funktionalen Elementen bzw. Modulen geachtet.

Um die parallele Entwicklung der Module zu erleichtern und schnell Funktionen anpassen zu können, wurde ein service-orientierter Ansatz nach dem Prinzip der Microservices gewählt. Dabei werden Funktionen in möglichst kleine und einfache Komponenten unterteilt, jeweils realisiert durch eigene, unabhängige Module die ihre Dienste über präzise definierte Schnittstellen anbieten. Die funktionale wie auch technische Komplexität der Module kann so überschaubar gehalten werden und für jedes Modul kann die zur Erfüllung der Aufgabe am besten geeignete Technologie eingesetzt werden. Für die Nutzung der Dienste eines Moduls ist es

nicht erforderlich zu verstehen, wie das Modul den Dienst erbringt, wodurch eine Abstrahierung erreicht wird. Um komplexere Aufgaben zu erfüllen, kann ein Service wiederum andere Services aufrufen. Dies wird auch als Orchestrierung bezeichnet. Nur ein Teil der Dienste wird dabei direkt vom Client aufgerufen, bei anderen handelt es sich um rein interne Module.

Eventorientierung und Zustand

Um kontextbezogen Informationen bereitstellen zu können, muss dem Assistenzsystem der Zustand der physischen Umgebung, beispielsweise der Montagefortschritt bekannt sein. Dies lässt sich erreichen, indem ausgehend von einem bekannten Zustand (wie dem Beginn der Montage mit der lackierten Karosserie) alle Ereignisse protokolliert werden, die eine Zustandsänderung beschreiben. Im Kontext eines Montageassistenzsystems können einzelne Tätigkeiten wie beispielsweise das Aufnehmen eines Bauteils als Ereignisse betrachtet werden. Aus der Summe der Ereignisse lässt sich der aktuelle Zustand sowie der Pfad zu diesem Zustand rekonstruieren. Je minimaler der Montagefortschritt ist, den ein Ereignis beschreibt, desto granularer bzw. präziser ist die resultierende Abbildung des Zustandes.

Alternativ kann auch direkt der neue Zustand als Momentaufnahme gespeichert werden, ohne die Ereignisse selbst zu dokumentieren. Dies bietet den Vorteil, dass der aktuelle Zustand sofort und ohne Berechnungen abrufbar ist. Jedoch gehen dabei die historischen Informationen, die beschreiben, wie dieser Zustand erreicht wurde, verloren. Für eine Analyse aus Montagesicht bieten die Ereignisse, beispielsweise die Information wann welcher Arbeitsschritt von welchem Mitarbeiter mit welchen Betriebsmitteln und Parametern bei welchem Fahrzeug durchgeführt wurde, wesentlich mehr Erkenntnisse als lediglich ein Endzustand, der besagt, dass die Montage abgeschlossen ist. Da die Steigerung der Transparenz ein wesentliches Entwicklungsziel darstellt, wurde für die Implementierung daher das ereignisorientierte Zustandsmodell (engl. „*Event-sourcing*“) gewählt. Informationen über Vorgänge in der physischen Umgebung erhält das System entweder durch angebundene Sensorik oder Nutzereingaben, die ein entsprechendes Ereignis generieren. Dieses Ereignis löst dann die serverseitige Verarbeitung in Form einer Transaktion aus. Dieses Schema wird daher auch als ereignisorientierte Softwarearchitektur bezeichnet.

Um die Vorgänge in der Produktion zu dokumentieren und Analysen zu ermöglichen, müssen die Daten langfristig verfügbar sein. Daher ist es erforderlich das System mit einer persistenten Datenspeicherung auszustatten. Bei den anfallenden Daten handelt es sich nahezu ausschließlich um strukturierte Daten mit definierten Beziehungen, die sich gut in einem relationalen Datenmodell abbilden lassen. Zur Sicherstellung der Konsistenz ist das System so konzipiert, dass zustandsbeschreibende Ereignisse ausschließlich in der Datenbank gespeichert und weder serverseitig noch auf der Seite des Clients Zustandsinformationen vorgehalten werden. Tritt bei einer Transaktion ein Problem auf, bleibt das Zustandsmodell unverändert und der Nutzer wird sofort informiert.

Kommunikation

Die Kommunikation zwischen Client, Server und Sensorik / Aktorik wurde nach dem Beobachter-Muster (engl. „*observer-pattern*“) entworfen, welches ein Prinzip zur Weitergabe von Änderungen zwischen Subjekten beschreibt und komplexe Kontrollflüsse ermöglicht. Nach dem *publish-subscribe*-Modell kann jeder Kommunikationsteilnehmer Nachrichten zu einem Thema veröffentlichen. Andere Teilnehmer, die als Beobachter zu bestimmten Themen angemeldet sind, empfangen dann die entsprechenden Mitteilungen. Das beobachtete Subjekt muss keine Kenntnis über Art und Struktur der Beobachter besitzen. Die jeweilige Reaktion, beispielsweise auf eine Statusaktualisierung, ist im Beobachter implementiert. Da Komponenten gleichzeitig als Beobachter wie auch als beobachtetes Subjekt auftreten können, ermöglicht dieser Ansatz eine bidirektionale, ereignisorientierte Kommunikation. Realisiert wird diese Form der Kommunikation mittels eines zentralen Message-Brokers, zu dem alle beteiligten Stellen eine Verbindung aufbauen.

Architektur

Die generische Architektur mit ihren wesentlichen Elementen ist in **Abbildung 56** dargestellt. Die Serverseite besteht im Wesentlichen aus der Datenbank für die persistente Datenspeicherung und dem Webserver, der gewisse Dienste bereitstellt und damit die Brücke zwischen Client und Datenbank herstellt. Die Applikationslogik wird sowohl serverseitig in den Diensten, wie auch clientseitig realisiert. Insbesondere der Ablauf wird überwiegend clientseitig durch ein Logik-Modul gesteuert, das definiert welche Dienste in welcher Situation aufgerufen werden. Peripheriesysteme wie digitale Betriebsmittel bieten ihrerseits wiederum Dienste, die von den Diensten des Webserver oder direkt durch den Client aufgerufen werden können. Auf die Dienste und die Ablaufsteuerung wird im Abschnitt 6.2.3 genauer eingegangen. Letztlich kann der Client auch direkt Dienste aufrufen, die von anderen Unternehmensapplikationen (*3rd party Services*) bereitgestellt werden, beispielsweise zum Laden von 3D Modellen aus der Materialstammdatenbank.

Die Schnittstellen zu den Systemen der Produktentwicklung und Montageplanung wurden in diesem Architekturmodell vernachlässigt, sie können jedoch ebenfalls als Dienste des Webserver betrachtet werden. Für die hier beschriebene Anwendung wurden diese Dienste aufgrund der Rahmenbedingungen so gestaltet, dass sie (zyklisch aufgerufen) Informationen aus den Quellsystemen abfragen, transformieren und in die relationale Datenbank des Assistenzsystems speichern bzw. die dort vorhandenen Daten aktualisieren. Dieses Prinzip wird auch als ETL-Prozess (Extract, Transform, Load) bezeichnet.

Derartige Schnittstellen lassen sich vergleichsweise unkompliziert und ohne Anpassung der Quellsysteme realisieren. Der Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, dass Aktualisierungen nur zyklisch (beispielsweise einmal pro Nacht) erfolgen und je Ausführung eine große Datenmenge verarbeitet werden muss. Vorteilhafter ließe sich die Anbindung gestalten, wenn die Quellsysteme ebenfalls ereignisgetrieben arbeiten und selbstständig Aktualisierungen senden würden, die auf Empfängerseite laufend in kleinen Transaktionen verarbeitet werden können. Ungeachtet der Mechanismen zur Einspeisung der Daten ist für die Architektur an dieser Stelle primär relevant, dass während der Nutzung des Assistenzsystems alle erforderlichen Daten in seiner Datenbank vorliegen.

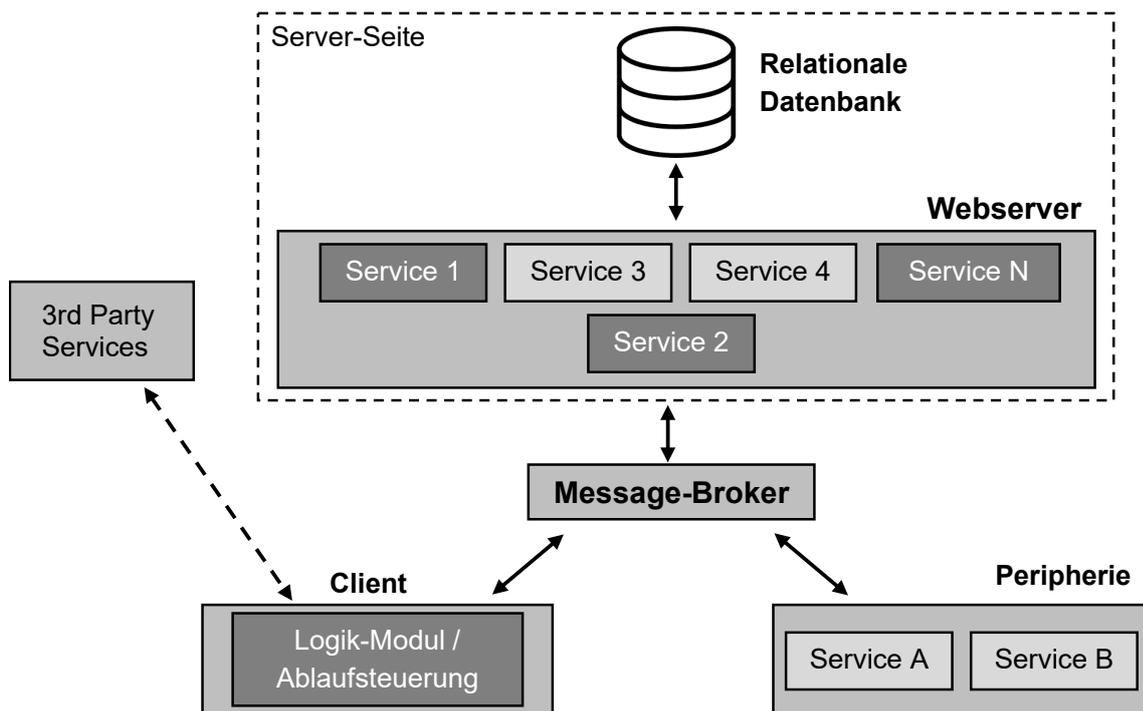


Abbildung 56: Generische Architektur des Montageassistenzsystems

6.2.3 Arbeitsablauf und Applikationslogik

Um die erforderlichen Funktionen und Module sowie die Logik zur Realisierung der Assistenzfunktionen ableiten zu können, muss zunächst der angestrebte Arbeitsablauf (engl. „Workflow“) modelliert werden. Das Einsatzszenario, auf dessen Basis das Assistenzsystem entworfen wurde, wird im Folgenden erläutert. **Abbildung 57** zeigt den grundlegenden Ablauf.

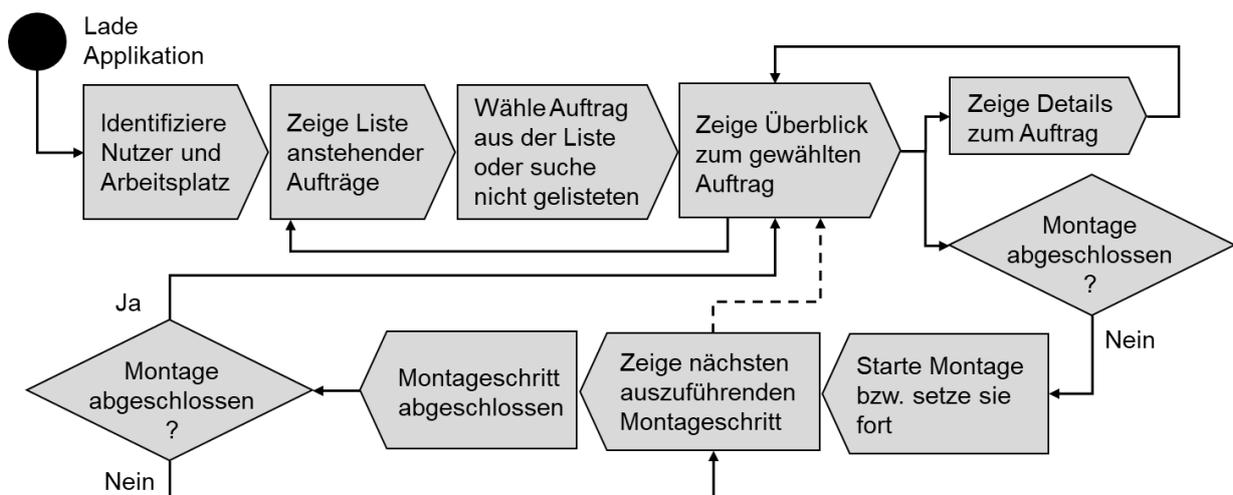


Abbildung 57: Übersicht über den grundlegenden Arbeitsablauf

Der Werker befindet sich in seinem Arbeitsbereich. Zu Arbeitsbeginn startet er die Applikation und meldet sich an. Dabei wird auch die Arbeitsstation bzw. Zone identifiziert. Anschließend

präsentiert das System dem Werker eine Liste der anstehenden, noch nicht abgeschlossenen Aufträge. Er hat die Möglichkeit einen Auftrag aus dieser Liste zu wählen oder mittels einer Suchfunktion nach einem anderen Auftrag zu suchen. Daraufhin zeigt das System eine Übersicht zu dem gewählten bzw. gesuchten Auftrag. In dieser werden grundlegende Informationen zum Auftrag wie beispielsweise die Fahrzeugkonfiguration, die Verwendung, Termine und der Lieferstatus des Materials angezeigt. Daneben gibt das System Auskunft über den Montagefortschritt. Der Anwender hat die Möglichkeit aus dieser Ansicht heraus Details wie die Positionsliste einschließlich einer Visualisierung des Produkts oder eine Liste der Montageschritt aufzurufen. Alle Anzeigen werden dabei stets auf die Zone bezogen, in der sich die Station befindet. Sofern die Montage noch nicht abgeschlossen ist, kann der Anwender sie aus der Übersicht starten bzw. fortsetzen.

Das System zeigt dann den ersten Montageschritt an, der in der Zone auszuführen ist und der noch nicht vollständig abgeschlossen wurde. Wird der Montageschritt quittiert, prüft das System ob alle Schritte erledigt sind und zeigt entweder den nächsten an oder kehrt nach Abschluss aller Tätigkeiten zur Übersichtsanzeige zurück. Der Werker kann dabei die Montage jederzeit unterbrechen, zur Übersicht zurückkehren und die Tätigkeit zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufnehmen.

Für die Ableitung der Funktionen und Module muss der Montageprozess selbst noch weiter heruntergebrochen werden. Dazu sei noch einmal auf das Modell eines Montageschritts aus Abschnitt 4.2.2 und das darauf aufbauende, im Abschnitt 5.2.3 vorgestellte Konzept zur Darstellung der Arbeitsanweisungen verwiesen. Aus dem Datenmodell sei vorweggenommen, dass ein Montageschritt keine, eine oder mehrere Positionen (bzw. Teilmengen dieser) umfassen kann. Ebenso kann ein Montageschritt keine, eine oder mehrere Verbindungen enthalten. Ein Montageschritt gilt als abgeschlossen, wenn alle ihm zugeordneten Komponenten identifiziert und als verbaut markiert und die Tätigkeit selbst quittiert oder alle Verbindungen als korrekt durchgeführt dokumentiert wurden. Die Montage in einer Zone gilt als abgeschlossen, wenn alle der Zone zugeordneten Montageschritte vollständig ausgeführt und alle Komponenten als verbaut (oder bei Fehlern der Positionsliste als nicht benötigt) markiert wurden.

Abbildung 58 zeigt den weiter ausgearbeiteten Ablauf. Wird die Montage gestartet bzw. fortgesetzt, ist zunächst zu prüfen, ob es Montageschritte gibt, die noch nicht vollständig abgeschlossen wurden. Sofern dies der Fall ist, muss auf Basis der Montagereihenfolge bzw. Abtaktung der erste ausstehende Montageschritt identifiziert werden. Im Rahmen eines Montageschritts werden zuerst verknüpfte Positionen geprüft. Bestehen Verknüpfungen, bei denen das zugehörige Material noch nicht identifiziert bzw. als verbaut gekennzeichnet wurde, zeigt das System die Ansicht „Aufnehmen“ mit einer Liste des benötigten Materials und des Bereitstellorts. Diese Liste muss vom Werker abgearbeitet werden, indem jede Komponente mit der angegebenen Methode (z.B. Scan eines Strichcodes mittels optischem Handscanner) erfasst wird. Sofern sich das Material in einem mit Signalisierung bzw. Sensorik ausgestatteten Behälter oder Regal befindet, steuert das System dieses Betriebsmittel bei der jeweiligen Position an. Wird bei der Erfassung Material erkannt, das nicht zu den Vorgaben passt, wird der Werker unmittelbar durch eine Fehlermeldung gewarnt. Zudem hat der Werker die Möglichkeit nicht verknüpfte Positionen aus dem, in Abschnitt 5.3.1 konzipierten Teilespeicher zu wählen, falls ihm auffällt, dass eine benötigte Komponente fehlt.

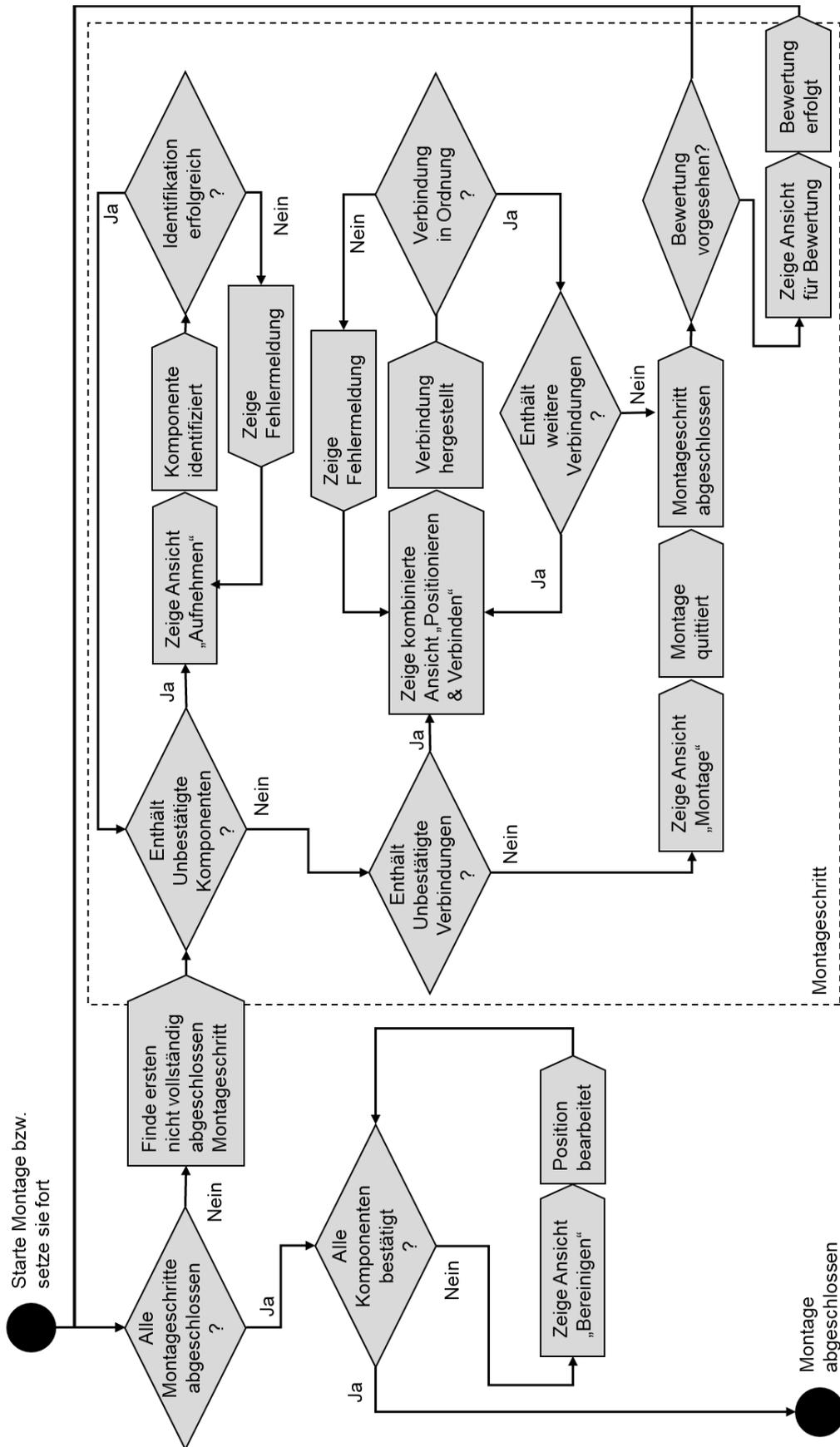


Abbildung 58: Detaillierte Darstellung des Arbeitsablaufs bei der Montage

Ist das Aufnehmen des Materials abgeschlossen oder erfordert der aktuelle Montageschritt kein Material, so wird als nächstes geprüft, ob die Aufgabe eine Verbindung oder einen anderen Prozess mit einem, an das System angebindenen digitalen Werkzeug oder einer Anlage umfasst. Ist dies der Fall, wird das Betriebsmittel angesteuert und die Ansicht „Positionieren und Verbinden“ bzw. die zum jew. Prozess gehörende Ansicht dargestellt. Die Quittierung des Montageschritts erfolgt dann automatisch, sobald die Anlage bzw. das Werkzeug eine korrekte Ausführung zurückmeldet. Andernfalls zeigt das System die generische Ansicht „Montieren“ mit den, von der Montageplanung definierten Arbeitsanweisungen und einer Visualisierung. Die Ausführung muss dabei manuell durch den Werker quittiert werden.

Anschließend wird mit dem nächsten Montageschritt dasselbe Verfahren durchlaufen. Sind alle Schritte abgearbeitet, wird abschließend geprüft, ob alle Positionen der fahrzeugspezifischen Positionsliste als verbaut markiert wurden. Trifft dies nicht zu, zeigt das System den Teilespeicher. Idealerweise enthält dieser nur noch Positionen, die für das Fahrzeug nicht benötigt werden und die aufgrund von Fehlern in der Produktstruktur in die Liste gelangt sind. Der Werker kann diese Positionen dann prüfen, als nicht verbaut kennzeichnen und die Fehler in der Produktstruktur an die Entwicklung melden. Im ungünstigsten Szenario bemerkt der Werker beim Prüfen des Speichers, dass eine tatsächlich erforderliche Position nicht verbaut wurde. In diesem Fall ist eine Nacharbeit unumgänglich. Durch eine umgehende Korrektur der Verknüpfung kann jedoch sichergestellt werden, dass der Fehler bei nachfolgenden Einheiten nicht erneut auftritt.

An jeder Stelle des Montageablaufs, daher in allen Montageansichten soll dem Werker über eine zentrale Schaltfläche der Zugriff auf die Problemmeldungsfunktionalität ermöglicht werden. Auf Basis des, dem System bekannten Kontexts werden dem Werker nach Auswahl der Funktion potenzielle Fehler in Form einer generischen Beschreibung (der ersten Ebene des im Abschnitt 5.3.3 vorgestellten Fehlerbaums) angezeigt. Wählt er eine der Beschreibungen an, bietet das System auf Basis der Auswahl weitere Optionen, durch die er die Situation konkretisieren kann, bis das Ende eines Arms im Fehlerbaum erreicht ist. Ist die geführte Klassifizierung abgeschlossen, kann der Werker noch einen Kommentar anfügen. Zusätzlich soll es dem Werker ermöglicht werden über sein Smartphone ein Foto oder Video des Problems zu erstellen und dieses an die Meldung anzuhängen. Bestätigt der Werker die Meldung, wird eine Zusammenfassung angezeigt, die Meldung im System gespeichert und an den automatisch ermittelten Adressaten zugestellt. Im betroffenen Montageschritt wird daraufhin bei nachfolgenden Einheiten eine Warnung eingeblendet, die dem Werker signalisiert, dass zu diesem Schritt ein bekanntes Problem existiert. Er hat dann durch Anwählen der Warnung die Möglichkeit auszuwählen ob das Problem beim aktuellen Fahrzeug auch besteht. Analog wird nach Änderungen an dem betroffenen Montageschritt ein Hinweis eingeblendet und der Werker gebeten zu prüfen, ob das Problem durch die Änderung gelöst wurde.

Bei der initialen Übertragung eines Produktionsprogramms für ein Fahrzeugprojekt sowie bei Änderungen an diesem berechnet das Assistenzsystem auf Basis der in Abschnitt 5.4.1 beschriebenen Heuristik welche Bewertungen zur gezielten Absicherung bei welchem Fahrzeug durchgeführt werden sollen. Die Berechnung berücksichtigt dabei auch die gemeldeten und noch nicht gelösten Probleme, indem Fragen primär für Montageschritte vorgesehen werden, zu denen keine Defizite bekannt sind. Die Ergebnisse der Berechnung werden in der Daten-

bank hinterlegt und beim Abruf der Montagedaten zu einem Auftrag angefügt. Ist in den Daten zu einem Montageschritt eine Abfrage hinterlegt, so wird diese dem Werker entsprechend nach Quittierung der Montagetätigkeit angezeigt.

Hat ein Werker einen Arbeitsschritt bereits mehr als zehn Mal wiederholt, so dass von einem gewissen Übungsgrad ausgegangen werden kann und liegen zu dem Montageschritt keine bekannten Defizite vor, so blendet das System unter der Tätigkeitsbeschreibung einen ablaufenden Zeitbalken ein, um den Zeitdruck der Serie zu simulieren. Dabei wird zunächst mit der doppelten Planzeit begonnen und bei jedem weiteren Durchlauf um 10% reduziert, bis 130% der Planzeit erreicht sind. Gelingt es dem Werker die Tätigkeit innerhalb dieser Zeit auszuführen, so wird die Planzeit als realistisch betrachtet, da durch den höheren Übungsgrad sowie die geringere Varianz der Tätigkeiten in der Serie von einer weiteren Geschwindigkeitssteigerung ausgegangen werden kann.

Aus der Addition der Planzeiten der für ein Fahrzeug abzuarbeitenden Montageschritte ergibt sich die gesamte Planzeit für das jeweilige Fahrzeug. Die in der Praxis erzielbaren Montagezeiten liegen zwar in der Prototypenmontage deutlich über den Planzeiten der Serie. Jedoch lassen sich die Verhältnisse der Planzeiten für eine Abschätzung des fahrzeugspezifischen Aufwands und des Montagefortschritts nutzen, indem die Summe der Planzeiten der bereits erledigten Tätigkeiten der Summe der Planzeiten der noch ausstehenden Montageschritte gegenübergestellt wird. Liegen nach einigen Fahrzeugen im System ausreichend Daten über das Verhältnis der Planzeiten zu den realen Ausführungszeiten vor, ist auch eine Abschätzung der verbleibenden Montagedauer denkbar. Diese Metriken, zusammen mit Informationen über operative Probleme (wie beispielsweise fehlende oder schadhafte Komponenten) und daraus resultierende Stillstandszeiten sollen in einem Montage-Dashboard zusammengefasst werden, das sich an die Verantwortlichen der Prototypenmontage richtet.

Daten und Kennzahlen zu konzeptionellen Problemen, dem bereits erreichten Absicherungsgrad und der daraus abgeleiteten Projektreife sollen hingegen in einem eigenen Projekt-Dashboard präsentiert werden, das sich an die Verantwortlichen der Fahrzeugentwicklung richtet. Dort soll es den Auftraggebern und späteren Verwendern der Prototypen auch möglich sein die Montage ihrer Fahrzeuge zu verfolgen.

Für die Arbeitsvorbereitung, insbesondere die Schraubtechnik und die Logistik sollen zudem eigene Ansichten entwickelt werden, um Anforderungen (wie beispielsweise die Anpassung eines Verbindungsparametersatzes) und Problemmeldungen (wie ein fehlendes oder falsch geliefertes Bauteil) darzustellen.

Aufbauend auf dem beschriebenen Arbeitsablauf und der beschriebenen Funktionalität konnten die erforderlichen Funktionen definiert und die entsprechenden Module und Services konzipiert und implementiert werden. In **Abbildung 59** sind die wesentlichen Elemente dargestellt. Dabei wurde architekturell zwischen Front- und Backend unterschieden und festgelegt, welche Funktionen in welchem Bereich die jeweiligen Dienste realisiert werden sollen. Auf eine detaillierte Beschreibung wird hier jedoch verzichtet, da sie einerseits recht umfangreich und andererseits aus wissenschaftlicher Sicht für den Kern dieser Arbeit wenig relevant wäre.

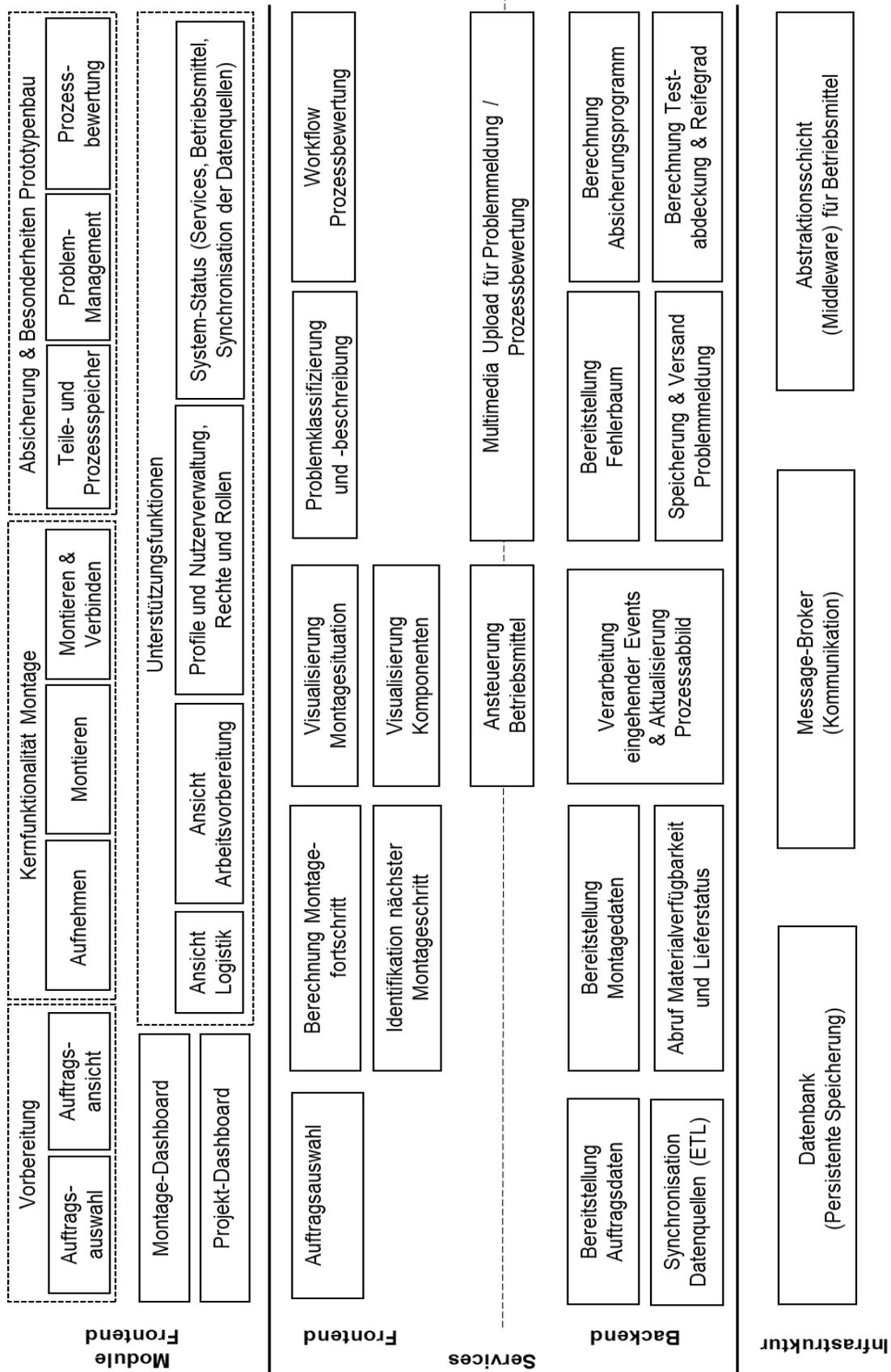


Abbildung 59: Übersicht über die wesentlichen Elemente des Assistenzsystems

6.2.4 Fachliches Datenmodell

Im fachlichen Datenmodell werden die für die geplante Applikation wesentlichen Informationen repräsentiert und ihre Zusammenhänge modelliert. Es bildet anschließend die Grundlage für die Implementierung der persistenten Datenspeicherung in der relationalen Datenbank und der Datenverarbeitungsfunktionen. Da die wesentlichen Zusammenhänge bereits bei der Modellierung zu Beginn des fünften Kapitels sehr ausführlich dargestellt wurden, wird das Datenmodell hier lediglich noch einmal zusammenfassend präsentiert. Es ist in **Abbildung 60** vereinfacht dargestellt, wobei zur Steigerung der Übersichtlichkeit auf eine explizite Abbildung aller Beziehungen verzichtet wurde.

Die Produktdaten und Montageprozessdaten bilden die beiden grundlegenden Kategorien im Datenmodell des Assistenzsystems, dabei werden sie von diesem lediglich aus Quellsystemen übernommen und nicht verändert. Aus ihnen wird, basierend auf der Fahrzeugkonfiguration, die einen Teil der Produktionsdaten bildet, die fahrzeugspezifische Prozessliste abgeleitet. Mithilfe der Informationen über die Werkstrukturen und die Zuordnung der Serienwerksbereiche auf die Zonen des Prototypenwerks wird diese fahrzeugspezifische Prozessliste auf die Zonen aufgeteilt.

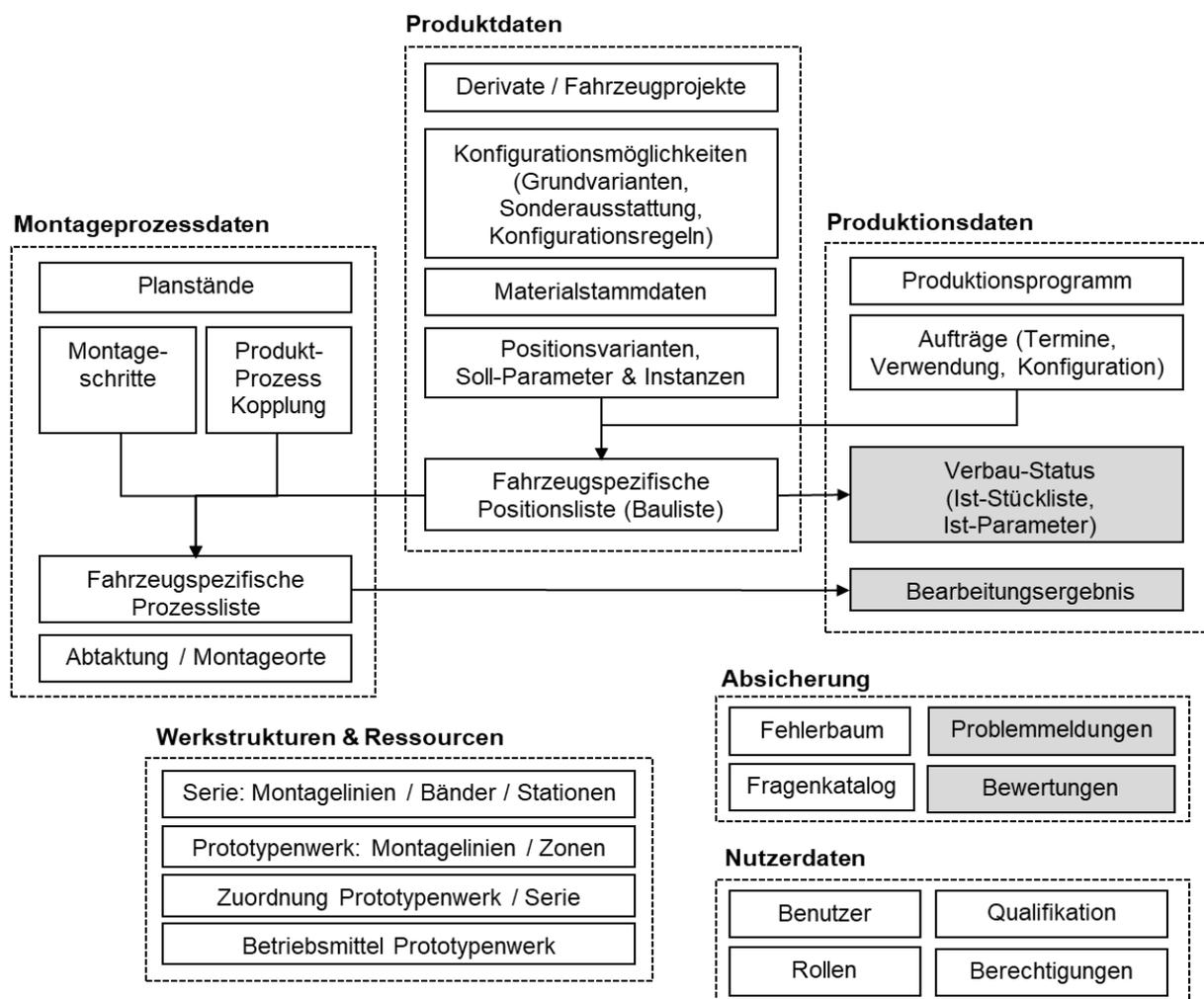


Abbildung 60: Fachliches Datenmodell des Montageassistenzsystems

Unter Anleitung durch das Assistenzsystem arbeitet der Werker die Montageschritte seiner Zone ab. Die bei der Nutzung des Systems erfassten Daten, wie der Verbau-Status der Komponenten, das Bearbeitungsergebnis der Montageschritte und die Ist-Parameter zählen zu den Informationen, die im System generiert und von diesem ausgewertet werden. Sie dokumentieren den Montageablauf und ermöglichen die Bestimmung des Montagefortschritts.

Für die Funktionalität der Problemmeldung und Prozessbewertung müssen einerseits der Fehlerbaum und der Fragenkatalog in der Datenbank vorliegen und andererseits die während der Nutzung des Systems generierten Problemmeldungen und Bewertungen gespeichert werden.

Weiterhin sind für die Implementierung einige unterstützende Informationen, beispielweise zu den Nutzern und ihren Berechtigungen bzw. Qualifikationen wie auch zu den Ressourcen und Betriebsmitteln des Prototypenwerks erforderlich.

Ausgehend von diesem oberflächlichen fachlichen Modell wurde das relationale Datenbankmodell entwickelt, das die Informationselemente auf konkrete Datenpunkte heruntergebrochen inklusive ihres Datentyps und ihrer Beziehungen repräsentiert. So muss beispielsweise modelliert werden, dass ein Fahrzeug immer über genau eine eindeutige, 13-stellige Fahrgestellnummer identifiziert wird und zu jedem Montageschritt je Fahrgestellnummer maximal ein Bearbeitungsergebnis mit einer Ausführungsdauer vorliegen darf. Aufgrund des Umfangs und der Komplexität des technischen Modells mit über 50 Tabellen und einigen hundert Relationen kann im Rahmen dieser Arbeit keine detailliertere Beschreibung erfolgen. Die Definition der Relationen und die Erzwingung ihrer Einhaltung durch die Datenbank gewährleisten später im Betrieb die Konsistenz der Daten (beispielsweise darf kein Bearbeitungsergebnis für eine nicht existierende Fahrgestellnummer gespeichert werden), weshalb eine gewissenhafte und korrekte Modellierung der Beziehungen für die korrekte Funktion des Systems essenziell ist.

6.3 Implementierung und Entwicklungsergebnis

Alle Softwaremodule, sowohl client- wie auch serverseitig wurden in der Programmiersprache *JavaScript* bzw. ihrem typisierten Derivat *TypeScript* entwickelt. Für das Frontend kam das *Angular 2* Framework [189], für die serverseitigen Komponenten die *Node.JS* Laufzeitumgebung [190] zum Einsatz. Die event-basierte, bidirektionale Kommunikation zwischen Front- und Backend wurde auf Basis von *Websockets* mit dem Framework *Socket.IO* [191] realisiert. Zur Auslieferung der statischen Komponenten des Angular Projekts wurde der *Apache 2* Webserver [192] und für das Backend *Express.JS* [193] eingesetzt.

Als relationale Datenbank für die persistente Datenspeicherung wurde *MySQL* [194] verwendet. Um die Aufträge, Fahrzeugkonfigurationen und die Produktstrukturdaten sowie die Montageplanungsdaten in die Datenbank zu übertragen, wurden in den Quellsystemen entsprechende Datenbanksichten bereitgestellt, die zyklisch von einem mit *Node.JS* realisierten Service abgerufen und mit der Datenbank des Assistenzsystems synchronisiert wurden (*Extract-Transform-Load Pipeline*).

Die Anbindung der Betriebsmittel erfolgte über das MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) Protokoll unter Verwendung serialisierter *JavaScript Object Notation* (JSON)

Telegramme. Als Broker wurde die Software *Mosquitto* der Eclipse Foundation eingesetzt [195]. Für Betriebsmittel, die nicht nativ über dieses Protokoll kommunizieren können, wurde entsprechende Middleware geschrieben, die zwischen den jeweiligen hersteller- bzw. anlagenspezifischen Protokollen und dem Protokoll des Assistenzsystems übersetzen.

Um die Bauteile sowie den Montagezustand bzw. die Montageaufgabe automatisiert visualisieren zu können, wurde die vom Fraunhofer Institut für Graphische Datenverarbeitung entwickelte Lösung *instant3DHub* in die Benutzeroberfläche integriert [196; 197]. Die *webvis* Komponente dieser Lösung ermöglicht es, 3D Geometrien im *Jupiter Tessellation* (JT) Format im Browser zu laden, zu transformieren und interaktiv darzustellen. **Abbildung 61** zeigt ein Beispiel für die Visualisierung einer Baugruppe, es lassen sich jedoch auch umfangreichere Szenen bis hin zu einem gesamten Fahrzeug darstellen.



Abbildung 61: Visualisierung von Bauteilen auf Basis von 3D Modellen im Assistenzsystem

Wählt der Werker ein Fahrzeug aus und startet die Montage, so wird der nächste erste bzw. der nächste noch nicht vollständig abgearbeitete Montageschritt angezeigt. Sind in diesem Schritt neue Bauteile in den Aufbau einzubringen, wird zunächst die Ansicht „Aufnehmen“ präsentiert, wie in **Abbildung 62** gezeigt. Diese umfasst auf der rechten Seite eine Liste der aufzunehmenden Positionen („Pick-Liste“), mittig einige Details zur aktuellen Position der Liste, wie die Teilebezeichnung, die Materialnummer und die Menge, den Bereitstellort, die Identifikationsmethode (Optischer Code, RFID, Pick-by-Light) sowie auf der linken Seite eine Visualisierung der Komponente. Wird eine Position als aufgenommen erfasst, beispielsweise weil der Werker das Etikett scannt oder ein Eingriff in das korrekte Fach des *Pick-by-Light* Regals registriert wurde, so wird die Position quittiert und die nächste angezeigt, bis alle quittiert wurden. Anschließend wechselt das System in die Montageansicht.

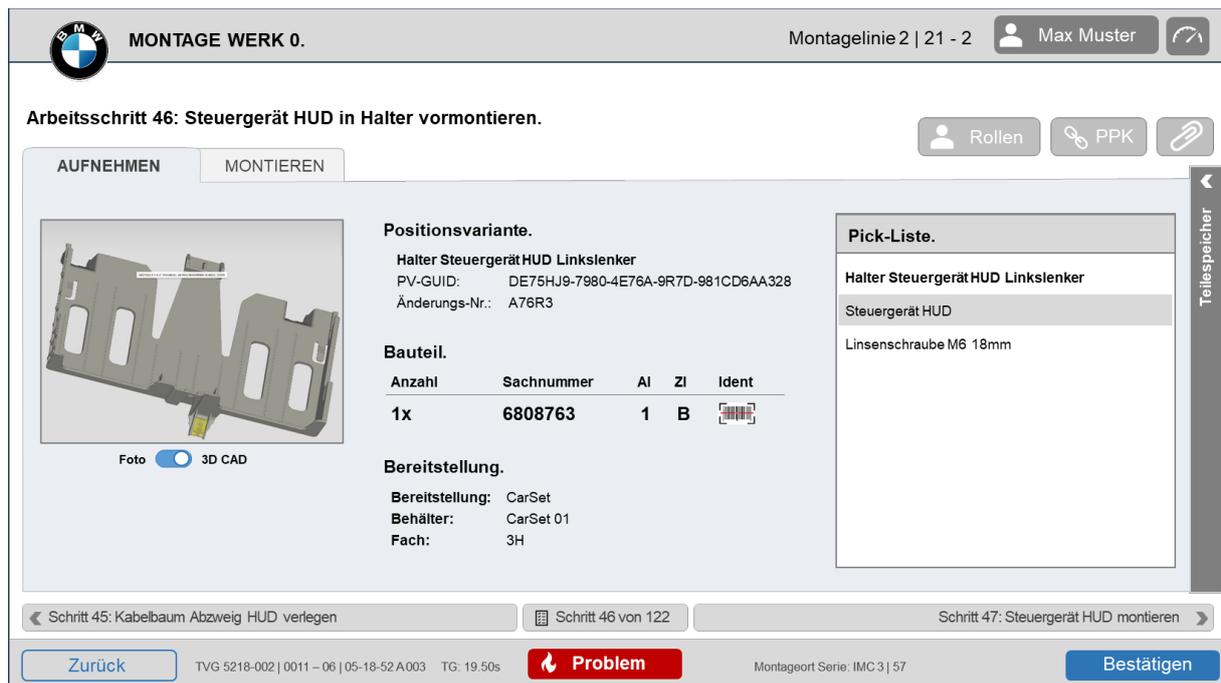


Abbildung 62: Die Ansicht "Aufnehmen" bei einem Arbeitsschritt mit mehreren Komponenten

Diese umfasst neben dem Titel des Montageschritts, der Tätigkeitsbeschreibung und ggf. zusätzlichen Montagehinweisen („kritische Merkmale“) sowie den Verbindungsparametern eine Visualisierung des Aufbauszustands und darin farblich hervorgehoben die Position der zu montierenden Komponente. **Abbildung 63** zeigt ein Beispiel für diese Ansicht.

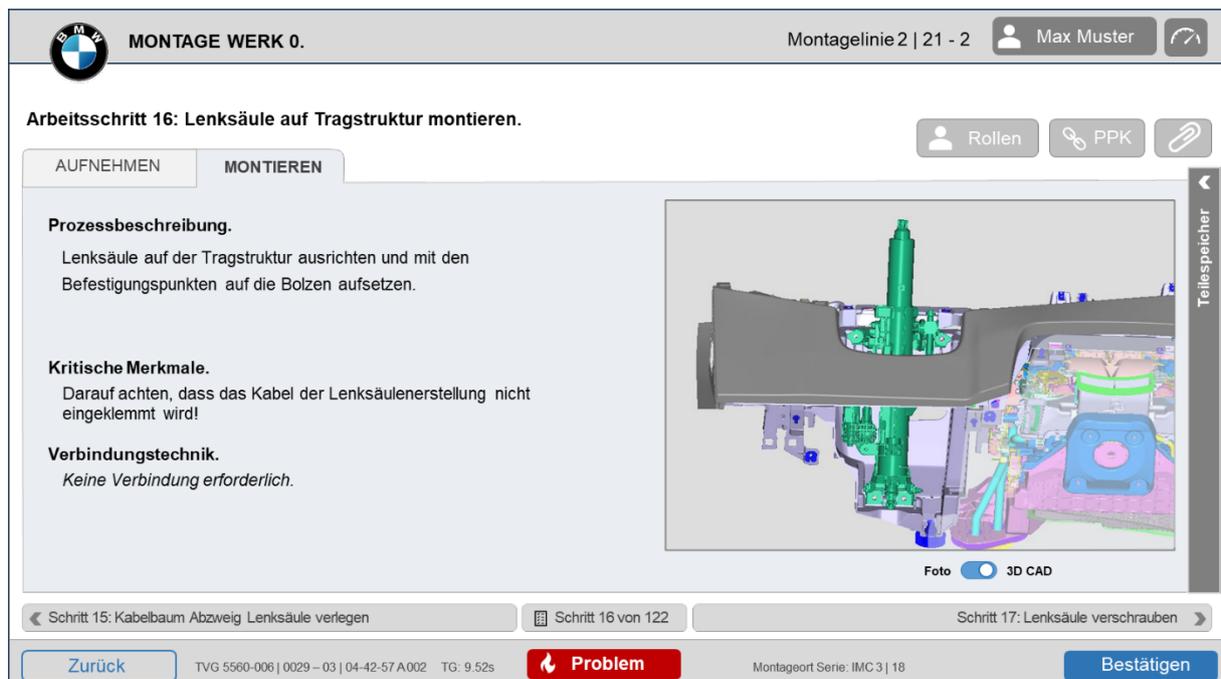


Abbildung 63: Die Ansicht "Montieren" bei einem einfachen Arbeitsschritt ohne Schraubverbindung

Umfasst der Montageschritt eine, mit dem digitalen Schraubsystem auszuführende Verschraubung, so wird die Schraubsteuerung automatisch angesteuert und der korrekte Parametersatz ausgewählt. Ein Ton signalisiert Bereitschaft und eine Leuchte weist den Werker auf das zu verwendende Schraubwerkzeug hin. Im Assistenzsystem wird ein grüner Schraubenschlüssel angezeigt und für jede der Schrauben erscheint ein kleines Schrauben-Symbol. Sofern es sich um eine Verschraubung mit Schraubstellenerkennung handelt, wird auch das *Tool-Tracking* System angesprochen und die aktuell erkannte Schraubstelle im WAS angezeigt. Führt der Werker eine Verschraubung aus, so wird ihm das Ergebnis als Hinweis und durch eine Färbung der Schrauben-Symbole angezeigt. Nach erfolgreicher Ausführung aller Verbindungen wird der Montageschritt quittiert und das System wechselt zum nächsten Schritt. Die Verschraubungs-Ansicht des Assistenzsystems und die kamerabasierte Schraubstellenerkennung sind in **Abbildung 64** gezeigt.

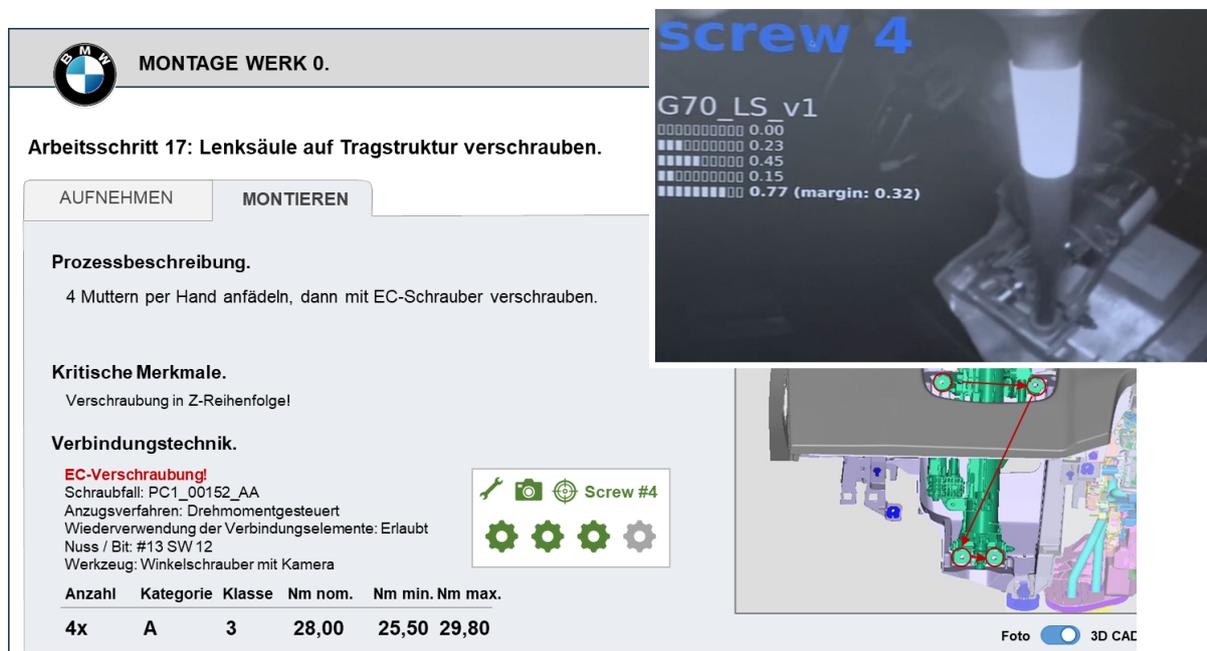


Abbildung 64: Schraubstellenerkennung und Darstellung der Verschraubung im Assistenzsystem

Wenngleich der Fokus des Forschungsprojekts auf der Methode und der Entwicklung des Assistenzsystems lag, wurde zu Demonstrations- und Versuchszwecken auch ein physischer Arbeitsplatz mit einigen digitalen Betriebsmitteln für Vormontagebereiche konzipiert, an dem die Arbeit mit dem Assistenzsystem erprobt werden kann. Dieser Arbeitsplatz ist in **Abbildung 65** schematisch dargestellt. Hinter dem Werkstückträger befindet sich ein rollbares Gestell aus Aluminiumprofilen, an dem die Komponenten des Systems angebracht sind. Zur Darstellung der Benutzeroberfläche des Assistenzsystems wurde ein 42" Bildschirm (*NEC Multisync V423-TM Optical Camera Touch*) zentral auf einer ausziehbaren, höhenverstellbaren und neigbaren Halterung montiert. Dieser verfügt über eine optische Berührungserkennung, die eine Eingabe bzw. Gestensteuerung analog zu konventionellen Touchscreens ermöglicht, jedoch im Gegensatz zu den üblicherweise verwendeten kapazitiven oder resistiven Technologien auch mit Handschuhen bedient werden kann. Der Bildschirm ist mit einem Industrie-PC (IPC) verbunden, der zusammen mit weiteren Systembestandteilen in einem, seitlich an dem Gestell befestigten Schaltschrank untergebracht ist.

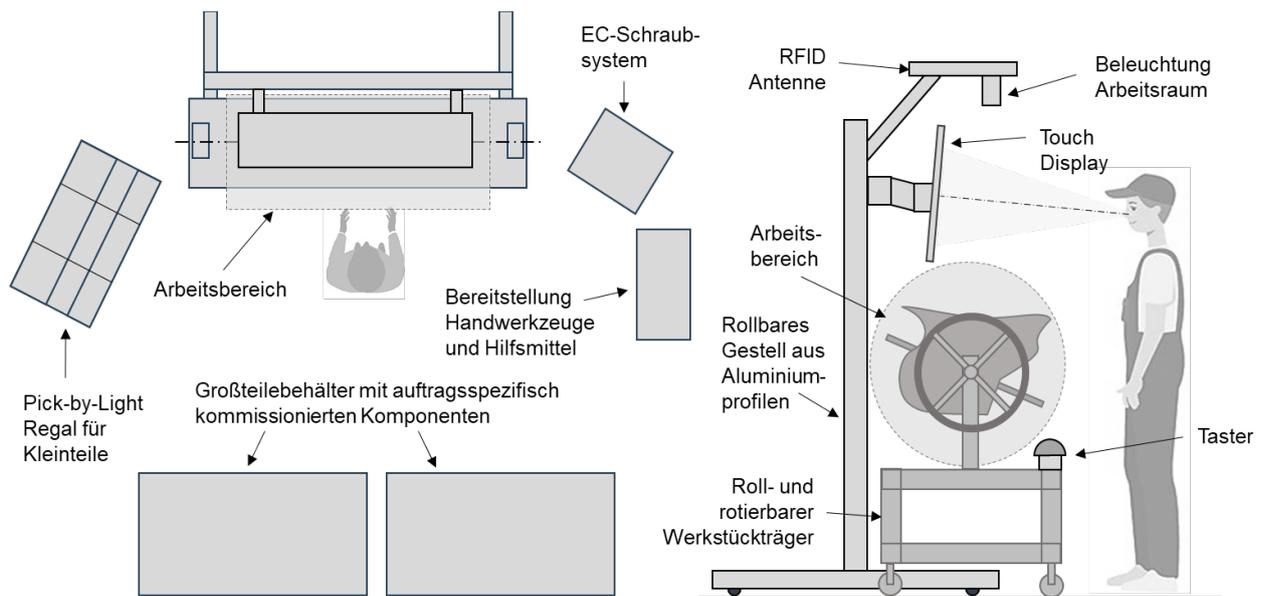


Abbildung 65: Schematische Darstellung des Versuchsarbeitsplatzes in der Cockpitvormontage

Zur Erfassung optischer Strich-, *DataMatrix*- oder QR-Codes (Beispielsweise auf den Etiketten der Bauteile) wurde ein kabelloser optischer Handscanner (*Datalogic PowerScan PD9531*) integriert, der per Funk mit einer Basisstation kommuniziert, welche wiederum per serieller RS232 Schnittstelle an den IPC angebunden ist. Als Alternative zu diesem Gerät wurde auf Wunsch der Anwender zusätzlich ein in einen Handschuh integrierter optischer Scanner (*ProGlove Mark 3*) angebunden. Dieser kommuniziert mittels *Bluetooth Low Energy* (BLE) mit einer Basisstation, die per USB mit dem IPC verbunden ist. Für beide Lösungen musste jeweils eine Middleware entwickelt werden, die das herstellereigene Datenformat in ein JSON-Objekt konvertiert und per MQTT verschickt.

Um eine Identifikation ohne aktive Handlung des Werkers zu ermöglichen, wurde über dem Arbeitsbereich eine RFID-Antenne angeordnet, deren Erfassungsbereich den Arbeitsbereich abdeckt. Die Erfassung geschieht dadurch bei Komponenten, die mit einem RFID-Tag versehen sind, automatisch, sobald sie in den Bauraum eingebracht werden. Das RFID-System (*Harting RF-R4000*) wurde so konfiguriert, dass die Informationen erfasster Tags automatisch per MQTT versendet werden.

Für Kleinteile, die in hoher Variantenzahl im Arbeitsbereich bereitgestellt werden müssen, wurde ein einfaches *Pick-by-light* System auf Basis einer speicherprogrammierbaren Steuerung (*Wago PFC100*) entwickelt. Das System umfasst neun Behälter, die jeweils mit einer RGB-LED zur Signalisierung und einer Lichtschranke für die Eingriffserkennung ausgestattet sind. Die verwendete Steuerung ist ebenfalls in der Lage direkt per MQTT zu kommunizieren.

Um auch Arbeitsschritte, die keine Bauteile oder Verschraubungen enthalten, ohne eine Bedienung des Touchscreens quittieren zu können, wurde mit einer magnetischen Befestigung ein physischer Taster zentral im Arbeitsbereich an dem Werkstückträger angebracht. Zudem wurde ein Tablet-PC (*Microsoft Surface*) im Bereich bereitgestellt, der genutzt werden kann,

um im Problemfall Fotos oder Videos aufzunehmen und diese per Upload-Funktion an die Problemmeldung anzuhängen.

In den Vormontagebereichen zählen Schraubwerkzeuge zu den wichtigsten Betriebsmitteln, aufgrund sicherheitskritischer Verbindungen bestehen dabei hohe Anforderungen an die Präzision und Zuverlässigkeit. Daher wurde der Arbeitsplatz mit einem digitalen Schraubsystem (*Atlas Copco PowerFocus 6000*) ausgestattet, das über drei Schraubwerkzeuge für unterschiedliche Drehmomentbereiche verfügt. Auch zur Anbindung dieses Systems musste eine Middleware implementiert werden. Diese ermöglicht es, ein in der Steuerung definiertes Schraubprogramm anzuwählen und die Anzahl der durchzuführenden Verschraubungen zu übermitteln. Nach Durchführung eines Schraubvorgangs übermittelt die Steuerung entsprechend der im Programm definierten Toleranzen ein Ergebnis, das angibt ob die Verschraubung in Ordnung ist. Um bei Verschraubungen mit mehreren Schrauben und einer definierten Reihenfolge die Einhaltung dieser sicherstellen zu können und eine Zuordnung der Ergebnisse bzw. der aufgezeichneten Drehmomentverläufe zu ermöglichen, wurde eines der Schraubwerkzeuge mit einem Kamerasystem (*ART - Advanced Realtime Tracking*) ausgestattet.

Abbildung 66 zeigt eine frühe Version des physischen Aufbaus bei einem Vorversuch zu Demonstrationszwecken. Der Aufbau, mit dem die im folgenden Kapitel beschriebene Studie durchgeführt wurde, befand sich in einem anderen Bereich, war jedoch ähnlich gestaltet.

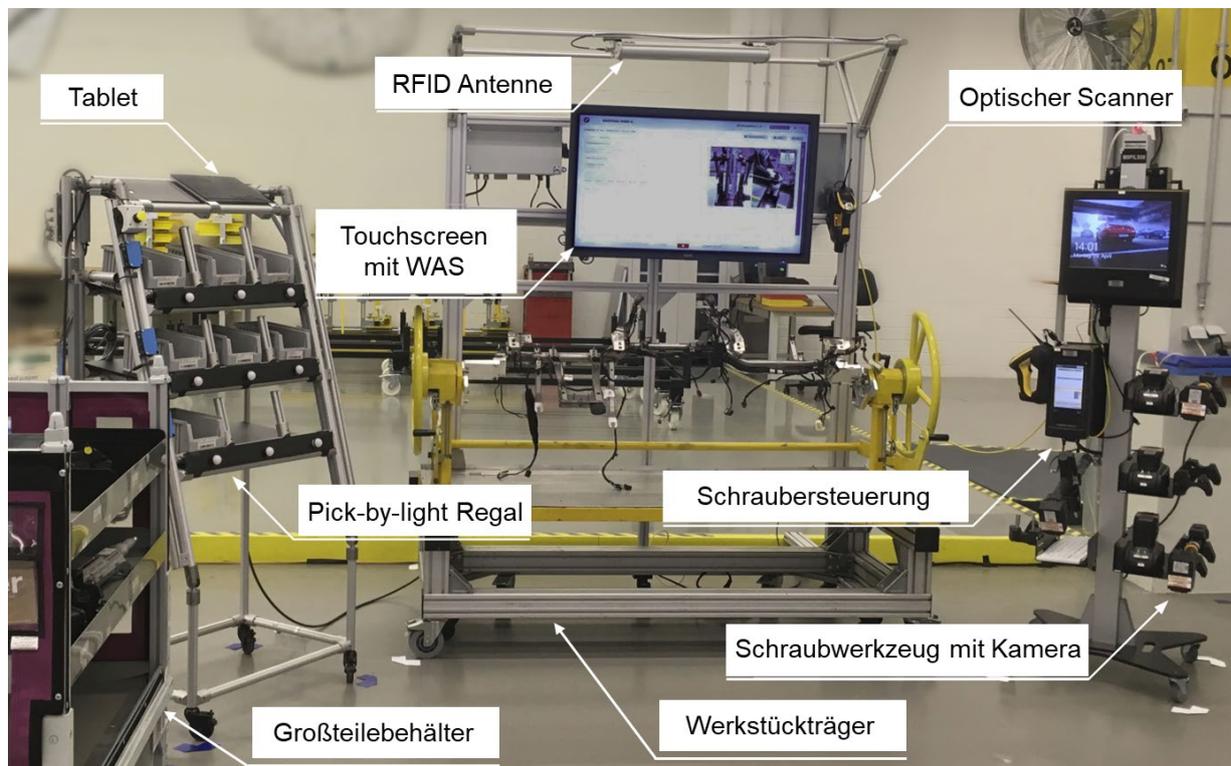


Abbildung 66: Physischer Aufbau des Versuchsarbeitsplatzes

7 Evaluation am Beispiel der Cockpit-Vormontage

Um den vorgestellten Ansatz und das Assistenzsystem und damit auch die entwickelte Methode zu evaluieren, wurde eine Fallstudie in einer realen Industrieumgebung durchgeführt. Da die Ausrüstung einer gesamten Montagelinie im Rahmen dieser Arbeit nicht zu realisieren war, wurde die bereits im Abschnitt 3.1.2 untersuchte Cockpit-Vormontage als repräsentativer Bereich von überschaubarem Ausmaß und beherrschbarer Komplexität als Betrachtungsbereich gewählt. Zudem stellt das Cockpit aufgrund der Varianz und des hohen Anteils flexibler Bauteile für die virtuelle Absicherung eine besondere Herausforderung dar.

7.1 Zielsetzung der Fallstudie

Ein gesamtes Fahrzeugentwicklungsprojekt, von der Zieldefinition bis zur stabilen Serienproduktion, erstreckt sich über mehrere Jahre. Die jeweilige Dauer, Aufwand und Kosten variieren dabei stark und sind von vielfältigen Faktoren abhängig, beispielsweise der Komplexität des Produkts, dem Neuheitsgrad bzw. der Reife der eingesetzten Technologien sowie der Erfahrung der beteiligten Personen und den Prozessen der Organisation. Verschiedene Projekte sind selbst innerhalb eines Unternehmens daher untereinander nur sehr begrenzt vergleichbar. Die Auswirkungen einer Optimierungsmaßnahme auf den Entwicklungsprozess präzise zu bewerten ist daher sehr schwierig. Zudem würde die Begleitung eines gesamten Fahrzeugprojekts den zeitlichen Rahmen der vorliegenden Arbeit übersteigen.

Diese Fallstudie konzentriert sich daher primär darauf, die direkt messbaren Auswirkung auf den Prototypenbau zu untersuchen. Des Weiteren werden Aspekte betrachtet, von denen plausibel angenommen werden kann, dass ihre Optimierung positive Auswirkungen auf den gesamten Entwicklungsprozess haben wird. Durch die praktische Anwendung im Rahmen der Studie sollen Verbesserungsmöglichkeiten im Ansatz sowie der technischen Ausgestaltung aufgezeigt werden. Die Ergebnisse sollen es ermöglichen, das Potenzial des Ansatzes abzuschätzen, und eine fundierte Entscheidung bzgl. der Weiterentwicklung bzw. dem Produktiveinsatz des Assistenzsystems zu treffen.

Zusammengefasst verfolgt die Studie die folgenden beiden Hauptziele:

- Die unmittelbaren Auswirkungen auf die Prototypenmontage beobachten und quantifizieren, um die Basis für eine Wirtschaftlichkeitsrechnung zu schaffen
- Sachverhalte beobachten und bewerten, die auf eine positive Beeinflussung des Serienentwicklungsprozesses schließen lassen

7.2 Betrachtungsbereich, Ausgangssituation und Rahmenbedingungen

Bei den ersten physischen Prototypen, die während der Fahrzeugentwicklung aufgebaut werden, handelt es sich in der Regel um umgebaute Serienfahrzeuge oder Teilaufbauten für bestimmte, zu erprobende Umfänge. Die letzten hingegen, die kurz vor dem Start der Serienproduktion auf der Basis von Serienbauteilen durch die Mitarbeiter des Serienwerks in diesem aufgebaut werden, unterscheiden sich nur noch geringfügig von den Kundenfahrzeugen. Diese Untersuchung konzentriert sich auf die dazwischenliegende Phase der Serienentwicklung, in der die Produktentwicklung bereits fortgeschritten und das Produktkonzept entsprechend reif ist, die Produktionsplanung jedoch noch am Anfang steht. In dieser Phase werden je nach Komplexität und Neuheitsgrad des Projekts über mehrere Monate hinweg einige dutzende bis hunderte Gesamtfahrzeugprototypen produziert. Sie dienen primär den Entwicklungsabteilungen als Versuchsträger zur Validierung, ihr Aufbau wird aber auch für die Entwicklung des Serienproduktionssystems bzw. die Planung der Integration in ein bestehendes Produktionsumfeld sowie die Qualifikation der Mitarbeiter genutzt.

Im betrachteten Unternehmen erfolgt die Prototypenproduktion in einem dedizierten Pilotwerk in räumlicher Nähe zur zentralen Entwicklungseinrichtung. Die Montage ist in mehrere Linien unterteilt, wobei ein Projekt je nach Stückzahl und zeitlichem Rahmen auf einer oder zwei Linien parallel erfolgt. Die Linien selbst sind dabei als lose getaktete Reihenmontage organisiert und in jeweils fünf aus Montagesicht relevante physische Zonen (Hauptlinie) sowie vier Vormontagebereiche für Antriebsstrang, Türen, Frontend und Cockpit unterteilt. Die Cockpitvormontage ist in einem räumlich vom Rest der Montage abgetrennten Bereich angesiedelt und durch einen zwischengeschalteten Puffer, der eine Vorproduktion erlaubt, zu einem gewissen Grad von der Hauptlinie entkoppelt. Aufgrund dieser Rahmenbedingungen, die einen gewissen Freiraum für Experimente bieten, wurde die Vormontage als Betrachtungsbereich für die Studie gewählt. Zudem wurden die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Untersuchungen zum Stand der Technik und dem Praxisdefizit ebenfalls in diesem Montagebereich durchgeführt, was die Vergleichbarkeit begünstigt.

Zunächst wurden zur Überprüfung der grundlegenden Funktionen und der Tauglichkeit des Assistenzsystems erste Vorversuche bei der Montage von Cockpits für ein neuartiges elektrisches Mittelklassefahrzeug durchgeführt. Auf Basis der dabei gewonnenen Erkenntnisse konnte das Bedienkonzept optimiert und die Stabilität des Systems verbessert werden. Die Hauptstudie fand über einen Zeitraum von zwei Monaten im Rahmen der Produktion von Prototypen einer Limousine der Oberklasse statt. Da bei dem Modell einige grundlegend neue Technologien und Konzepte sowie unterschiedliche Antriebskonzepte zum Einsatz kommen, es eine Vielzahl von Varianten und eine entsprechend hohe Komplexität aufweist, stellt es aus Sicht der Montage eine erhebliche Herausforderung dar. Das Cockpit bildet dabei im Vergleich zu anderen Modulen einen relativ überschaubaren Umfang. Dennoch deckt sein Aufbau die meisten Tätigkeitsarten ab, die im Allgemeinen bei der manuellen Fahrzeugmontage von Bedeutung sind. Je nach Fahrzeugkonfiguration umfasst es zwischen 80 und 100 Positionen, die in 120 bis 160 Arbeitsschritten montiert werden. Die für die Serienproduktion geplante Durchlauf-

zeit liegt bei etwa 20-25 Minuten, während in der Prototypenphase lediglich 4-6 Cockpits pro Tag produziert werden.

In der Vormontagezone sind zwei Arbeitsplätze gegenüberliegend angeordnet. Einer wurde für das Forschungsprojekt mit dem Assistenzsystem und den daran angebotenen Betriebsmitteln ausgestattet. Die Montage der Cockpits erfolgt auf rollbaren Werkstückträgern, die zwischen der Vormontagezone und der Hauptlinie im Umlauf sind. Kleinteile wie Schrauben, Muttern, Clips, etc. sind an den Arbeitsplätzen in Kleinladungsträgern bereitgestellt, größere Komponenten werden von der Logistik fahrzeugspezifisch vorkommissioniert in einen zentralen Logistikbereich der Linie angeliefert. Von dort werden sie bei Bedarf von den Mitarbeitern der Zonen abgeholt, in ihre jeweilige Zone transportiert und ausgepackt (Pull-Prinzip). Alle Bauteile und Baugruppen (bzw. ihre Verpackung) sind mit Etiketten versehen, auf denen die Materialnummer, ein Revisionsindex sowie ein Strichcode aufgedruckt sind. Die Mitarbeiter sind angewiesen, alle Komponenten bei Verbau zu erfassen, um eine Ist-Stückliste zu generieren. Aktuell stehen dafür Handheld-Geräte mit optischem Scanner zur Verfügung. Die Daten werden in dem MES gespeichert, in dem auch die Fahrzeugkonfigurationen definiert und die Soll-Stücklisten verwaltet werden.

Mitarbeiter aus dem Serienwerk, in dem künftig die Produktion des Modells erfolgen wird, sind für die mehrmonatige Prototypenbauphase in das Pilotwerk abgestellt und führen dort die Montagearbeiten aus. Dies erleichtert den Wissenstransfer und ermöglicht eine frühzeitige Bewertung und ggf. Einflussnahme durch das erfahrene Produktionspersonal. In dem betrachteten Projekt weisen die drei Mitarbeiter der Cockpit-Vormontage stark unterschiedliche Profile auf: Das jüngste Mitglied des Teams (1) verfügt über ca. zwei Jahre Erfahrung in der Cockpit-Montage ohne vorhergehende Erfahrung in der Automobilproduktion. Der zweite Monteur (2) war über sieben Jahre in wechselnden Bereichen der Montage tätig und verfügt über eine entsprechende Berufsausbildung. Mit über 30 Jahren Tätigkeit im Bereich der Cockpit-Montage verfügt der Leiter des Teams (3) über die umfangreichste Erfahrung, jedoch geringe Kenntnisse im Umgang mit IT-Systemen. Zu Beginn der Studie hatte das Team bereits über einige Wochen hinweg Cockpits des untersuchten Modells montiert. Dabei folgten sie einem groben Ablauf, den sie sich selbst erarbeitet hatten.

7.3 Vorgehensweise und Bewertungskriterien

Im Verlauf der Studie wurde der Aufbau von 18 Cockpits nach dem aktuell etablierten Vorgehen an der Station ohne Assistenzsystem als Referenz analysiert (Gruppe A), während die Montage an der zweiten Station mit dem System bei 30 Einheiten detailliert betrachtet wurde (Gruppe B). Um den Ablauf, den die Monteure selbst erarbeitet hatten zu beobachten und mit den Daten der Montageplanung abzugleichen, wurden initial drei Durchläufe ohne das System betrachtet (A_01 bis A_03). Dies diente dazu, eine gewisse Konsistenz und Qualität der Datenbasis sicherzustellen, um einer negativen Nutzungserfahrung und einer daraus möglicherweise folgend ablehnenden Haltung der Anwender aufgrund von unzureichender Datenqualität vorzubeugen. Letztlich waren jedoch nur geringe Anpassungen an der Sequenz und den Inhalten der Arbeitsanweisungen notwendig, um eine adäquate Ausgangsbasis zu erreichen. Im Anschluss erhielten die drei Mitarbeiter eine ausführliche Unterweisung in die Bedienung des Assistenzsystems. Die Monteure 1 und 2 wechselten sich bei der Montage an den beiden

Arbeitsplätzen ab, Mitarbeiter 3 übernahm Steuerung und Kontrolle und unterstützte bei Problemen. Während der ersten fünf Einheiten, die mit dem System aufgebaut wurden, betreute ein mit dem Assistenzsystem vertrauter Assistent die Mitarbeiter bei der Montage mit dem System, anschließend arbeiteten sie selbstständig. Einheiten der Gruppe A und B wurden in einem Verhältnis 1:2 untersucht, wobei keine Vorauswahl hinsichtlich der Konfiguration der Fahrzeuge oder des Personals stattfand. Neben den Daten, die das Assistenzsystem aufzeichnete, wurden zur Bewertung der Effizienz die Abläufe vom Autor und Mitarbeiter 3 beobachtet und protokolliert. Die Tätigkeiten und ihre gemessenen Zeitanteile wurden dabei in folgende Kategorien eingeordnet:

- Logistik und Handhabung - z.B. Transport der Behälter von der Logistik- zur Montagezone, Auspacken und Anrichten der Komponenten
- Kerntätigkeiten: Alle direkten, wertschöpfenden Montagetätigkeiten wie Aufnehmen, Ausrichten, Positionieren, Befestigen, Verbinden, etc.
- Dokumentation: Erfassung der Material-Etiketten, Ausfüllen von Check- und Stempel-listen für kritische Verschraubungen, Steckverbindungen, Bauteile, etc.
- Nacharbeit: Zeitaufwand zur Behebung von Montagefehlern oder zum Austausch schadhafter Komponenten
- Verzögerungen / Wartezeiten: Stillstand der Montage, beispielsweise aufgrund von fehlendem Material oder Unklarheiten

Alle erfassten Zeiten wurden auf Minuten gerundet, da eine präzisere Erfassung nicht durchgängig gewährleistet werden konnte und dies für die formulierten Fragestellungen als ausreichend erachtet wurde. Auftretende operative Probleme sowie entdeckte konzeptionelle Schwächen wurden über das WAS dokumentiert, ihre Auswirkungen wie Nacharbeit oder Verzögerungen im Protokoll festgehalten.

7.4 Ergebnisse und Diskussion

Alle 48 während der Untersuchung erhobenen Datensätze sind in der Auswertung berücksichtigt, keine Daten wurden ausgeschlossen. Das Versuchsprotokoll ist in Anhang C abgedruckt. Die ebenfalls erfassten Informationen wie Fahrgestellnummern, Fahrzeugkonfigurationen und Details zum Montageablauf sowie den dabei auftretenden Problemen mussten aus Informationsschutzgründen für die Veröffentlichung dieser Arbeit aus dem Protokoll entfernt werden, sind aber bei der Auswertung genutzt worden. **Abbildung 67** zeigt die Durchlaufzeiten für die beiden Gruppen, gegliedert nach der Art der Tätigkeit. Insbesondere bei der gesamten Durchlaufzeit, daher unter Berücksichtigung der Nacharbeit und Stillstandszeiten lässt sich eine signifikante Schwankung erkennen. In der Referenz-Gruppe liegt der Durchschnittswert der gesamten Durchlaufzeit bei 169,1 min, mit einem Maximum von 463 min, einem Minimum von 64 min und einer mittleren Standardabweichung von 73,9 min. In Gruppe B, den Einheiten, die mit dem Assistenzsystem aufgebaut wurden, liegt die durchschnittliche Durchlaufzeit etwa 35 % niedriger, bei 108,3 min. Auch die Standardabweichung ist mit 28,1 min deutlich geringer, das Minimum der Durchlaufzeit in dieser Gruppe beträgt 60 min, das Maximum 201 min. Diese signifikanten Unterschiede lassen sich zu einem großen Teil auf die Nacharbeit und

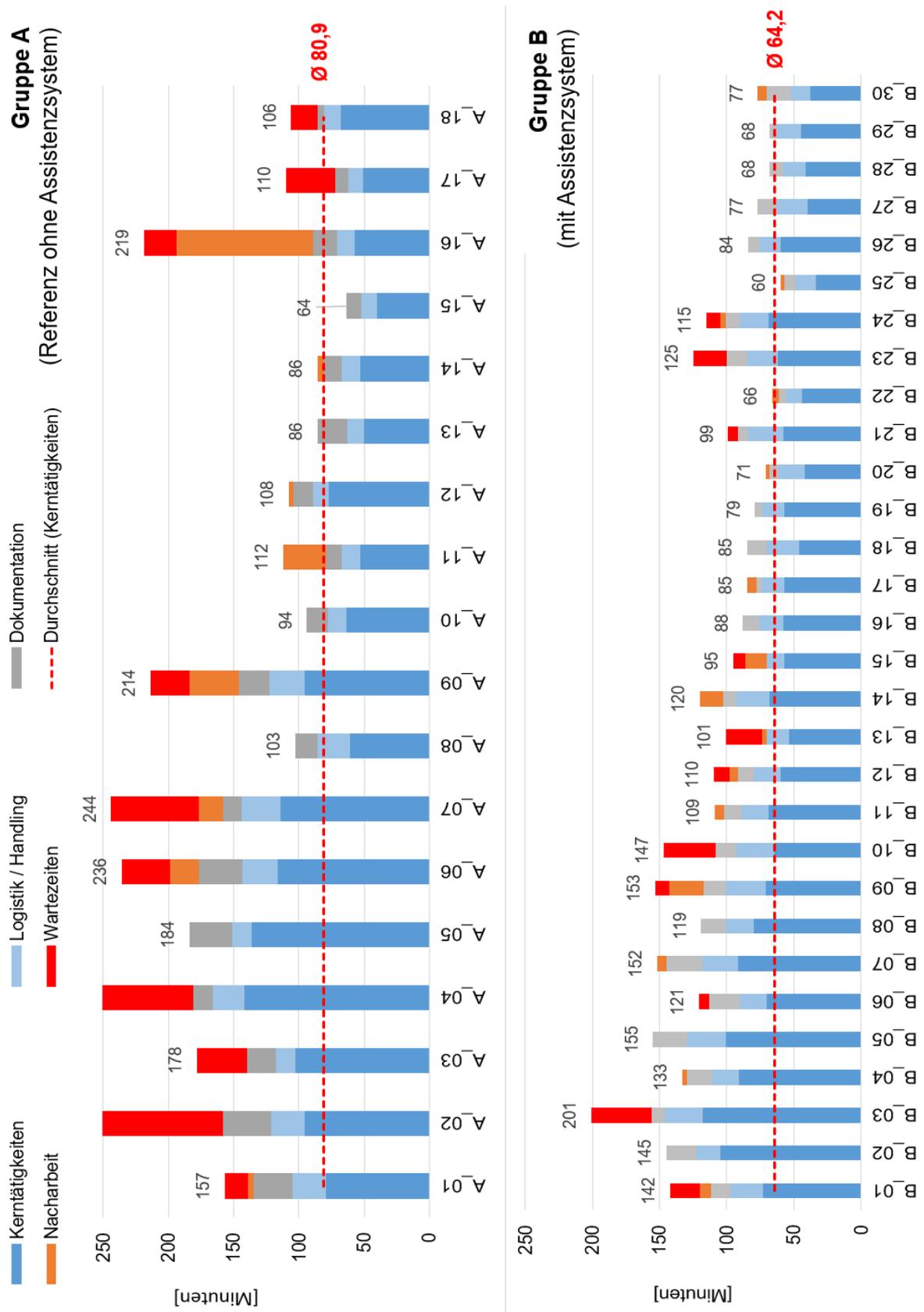


Abbildung 67: Auswertung der Durchlaufzeiten und der Zeitanteile in den beiden Versuchsgruppen

Wartezeiten zurückführen, die in Gruppe A in höherem Maße auftraten. Jedoch zeigt sich der Trend zu kürzeren Ausführungszeiten und geringeren Schwankungen in Gruppe B auch, wenn nur die Kern-Tätigkeiten betrachtet werden: Ein Durchschnitt von 64,2 min in Gruppe B stellt gegenüber den 80,9 min in Gruppe A eine Reduktion um 21 % dar, die Standardabweichung liegt mit 15,9 min 38 % niedriger als in Gruppe B mit 26,3 min. Bei Ausschluss der ersten fünf Einheiten aus Gruppe B (B_01 bis B_05), die zum Training der Werker in der Anwendung des Assistenzsystems genutzt wurden, fällt der Unterschied mit einem Durchschnittswert von 57,5 min noch deutlicher aus.

Abbildung 68 illustriert die durchschnittlichen Anteile der Tätigkeitskategorien je Einheit. Mit einer mittleren Dauer von 18,4 min in Gruppe A gegenüber 20,6 min in Gruppe B liegt die für Logistik und Handhabung erforderliche Zeit bei der Arbeit mit dem Assistenzsystem etwas höher. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Mitarbeiter angehalten waren an diesem Arbeitsplatz vor Montagebeginn alle Bauteile auszupacken, mithilfe des WAS auf Vollständigkeit zu prüfen und ordentlich bereitzulegen. Für die Aufbaudokumentation, welche die Erfassung der Materialetiketten, diverse Beschriftungen sowie das Ausfüllen papierbasierter Checklisten zu Verschraubungen und elektrischen Verbindungen umfasst, mussten im Mittel 15,9 min aufgewendet werden. Bei einem produktiven Einsatz des WAS würde dieses umfangreiche Daten zum Montagefortschritt und -ablauf sammeln und damit die papierbasierte Dokumentation durch einen wesentlich detaillierteren digitalen Datensatz ersetzen. Dadurch lassen sich in der untersuchten Zone weitere 10 – 15 % der Durchlaufzeit einsparen, bei gleichzeitiger Verbesserung der Datenqualität und Steigerung der Transparenz. Da im Rahmen dieser Studie eine vorschriftsgemäße Datenspeicherung im WAS nicht gewährleistet werden konnte, musste jedoch auch in Gruppe B eine Dokumentation nach dem etablierten manuellen Vorgehen erstellt werden. Der zeitliche Unterschied zwischen den beiden Gruppen ist dabei nicht aussagekräftig, da Mitarbeiter 3 an dem Arbeitsplatz mit WAS einen Teil der Aufgaben übernahm.

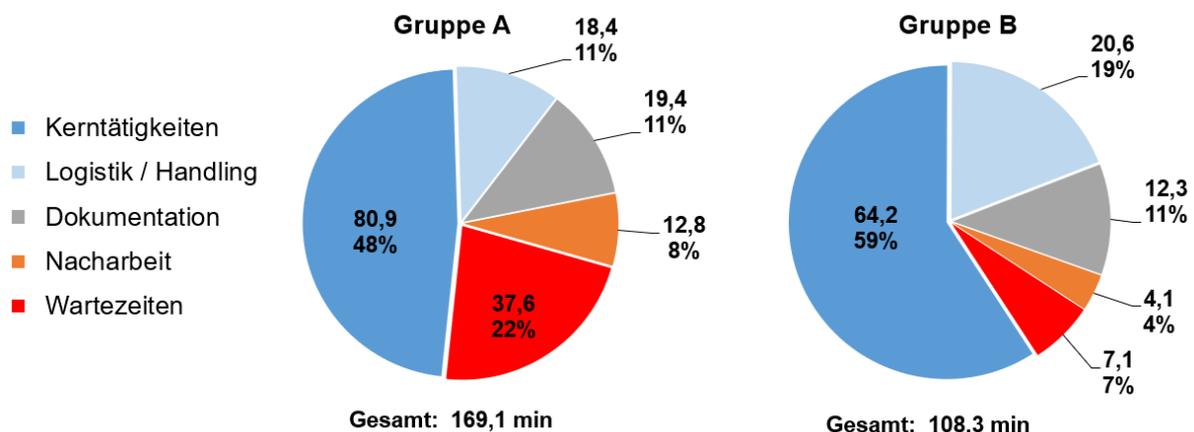


Abbildung 68: Durchschnittlicher Zeitaufwand nach Tätigkeitskategorie je Fahrzeug [min]

In Gruppe B musste nahezu 68 % weniger Zeit für Nacharbeit aufgewendet werden. Ein Großteil der erfassten Nacharbeit wurde durch Montagefehler wie falsche, vergessene oder falsch montierte Bauteile, vergessene oder fehlerhafte gesteckte elektrische Verbindungen sowie beschädigte Komponenten verursacht. Auch von den Monteuren nicht berücksichtigte, fahrzeug-spezifische Sondervorgaben führten zu beträchtlichem Aufwand.

In **Abbildung 69** sind die Hauptursachen und die kumulierten Verzögerungen dargestellt. Das WAS trägt zur Vermeidung einiger dieser Fehlerklassen bei (insb. Montagefehler und Informationsmangel, in gewissem Maße Montageschäden und fehlende Bauteile), wodurch sich das Nacharbeitsaufkommen entsprechend reduzieren und die Stabilität des Produktionssystems steigern lässt.

Mit durchschnittlich 37,6 min je Einheit betragen die Wartezeiten in Gruppe A mehr als das fünffache der Werte in Gruppe B. Abgesehen von Montagefehlern sowie fehlenden oder qualitativ unzureichenden Komponenten konnte Informationsmangel als wichtiger Grund hierfür ausgemacht werden. Unklarheiten führten beispielsweise bei neuen Varianten oder Sonderausstattungen, überarbeiteten Konzepten und Veränderungen von Prozessparametern regelmäßig zu Stillständen. Der aktuelle Ablauf sieht vor, dass die Mitarbeiter in diesen Fällen zunächst in mehreren domänenspezifischen Systemen wie dem MES oder dem Montageplanungssystem nach Informationen suchen. Sofern die Unklarheiten mit den dort vorgefundenen Informationen nicht ausgeräumt werden können, wenden sie sich an den Montagelinien-Koordinator der dann wiederum die Verantwortlichen aus Produktentwicklung, Montageplanung oder Produktionsintegration kontaktiert.

Indem das WAS Informationen aus mehreren dieser Systeme bezieht, verknüpft und bedarfsgerecht anzeigt, konnten die Mitarbeiter viele Fragestellungen deutlich schneller selbstständig beantworten. Insbesondere die Visualisierung auf Basis der 3D-CAD Daten mit der Möglichkeit historische und zukünftige Versionen zu vergleichen hat sich hierbei als vorteilhaft erwiesen. Dies äußert sich in lediglich 16 min Verzögerung aufgrund von Unklarheiten in Gruppe B gegenüber 149 min in Gruppe A. Zu einem gewissen Teil kann die geringere Verzögerung in Gruppe B auch auf den strukturierteren Arbeitsablauf mit dem WAS zurückgeführt werden, der zu einer niedrigeren Anzahl beschädigter Bauteile die nachbestellt werden müssen und der frühzeitigen Entdeckung fehlender Bauteile führt. Jedoch muss auch angemerkt werden, dass mehr als die Hälfte der Verzögerungen durch fehlende oder mangelhafte Komponenten verursacht wurde, die schlichtweg zufällig häufiger bei Einheiten der Gruppe A auftraten.

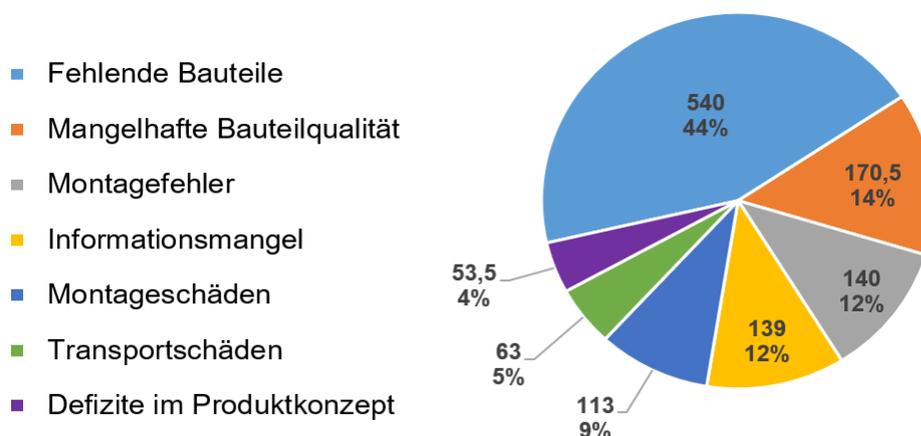


Abbildung 69: Wesentliche Problemklassen und die durch sie hervorgerufenen Verzögerungen

Diese Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz eines Montageassistenzsystems in der Prototypenmontage einige operative Vorteile bietet. Diese decken sich im weitgehend mit den Gründen, die in der Literatur häufig für den Einsatz derartiger Systeme in einer Serienproduktion angeführt werden. Jedoch konnten während der Studie auch einige Indikatoren für die angestrebte positive Auswirkung auf die Serienentwicklung beobachtet werden. So konnten neben den operativen Problemen auch 83 konzeptionelle Defizite in Produkt und Prozessen aufgedeckt werden. Diese wurden wie in **Abbildung 70** dargestellt klassifiziert.

Alle entdeckten Themen wurden mittels der Funktionalität des Assistenzsystems ausführlich dokumentiert. Im aktuellen Organisationsmodell wären diese Defizite, sofern sie überhaupt entdeckt worden wären, lediglich mündlich oder über handgeschriebene Notizen kommuniziert worden. Geringe Transparenz und die Gefahr von Informationsverlust und damit ungelösten Problemen sind das Resultat. Welche dieser Defizite wann durch eine andere Absicherungsmaßnahme entdeckt worden wären und ob bzw. in welchem Ausmaß sie im betrachteten Fahrzeugprojekt zu Verzögerungen oder zusätzlichen Kosten geführt hätten, lässt sich auf Basis der Fallstudie nicht beurteilen. Jedoch spricht die hohe Anzahl der Defizite im Produktkonzept in dieser fortgeschrittenen Projektphase nicht für einen hohen Reifegrad.

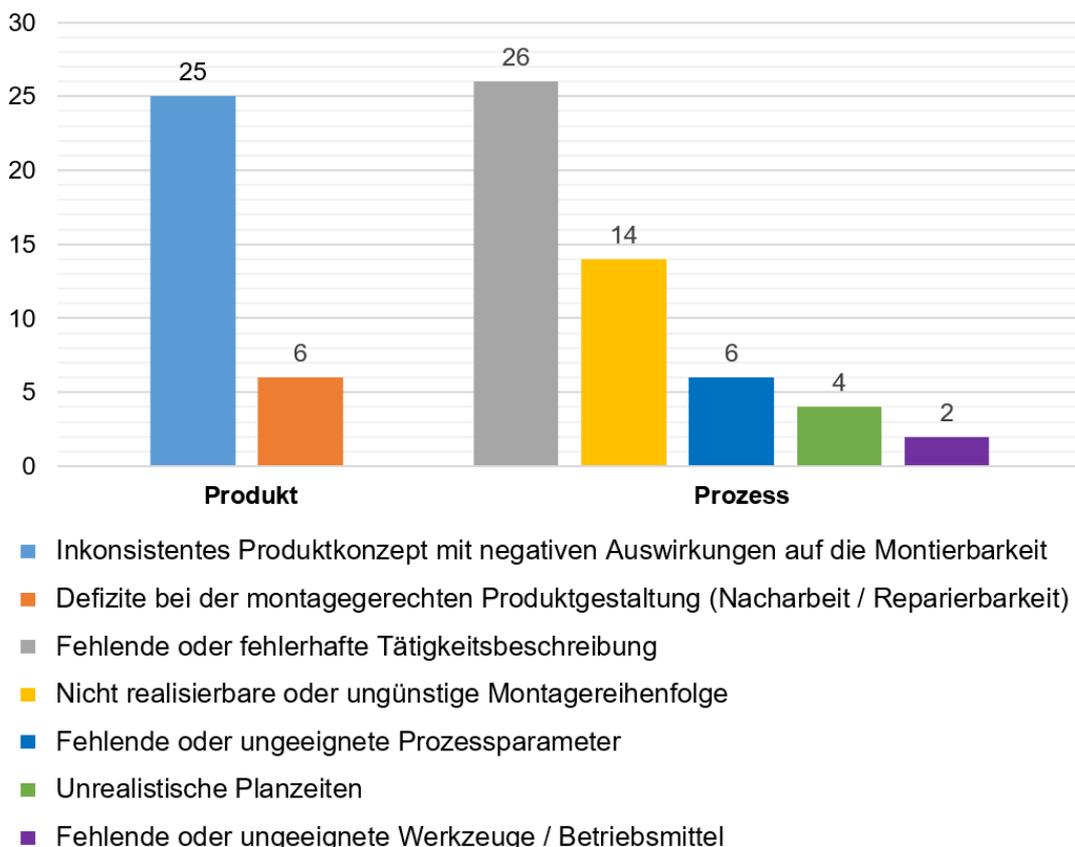


Abbildung 70: Im Rahmen der Fallstudie entdeckte konzeptionelle Defizite in Produkt und Prozess nach Fehlerart

Die Mehrheit der konzeptionellen Defizite im Montageprozess hat die Produktion in der Vorseienumgebung zwar nicht gravierend beeinträchtigt. Nachdem ein Großteil der Themen in

enger Zusammenarbeit mit der Montageplanung kurzfristig korrigiert werden konnte und die Mitarbeiter die optimierten Abläufe verinnerlicht hatten, stabilisierten sich die Durchlaufzeiten jedoch nach wenigen Tagen auf signifikant niedrigerem Niveau (in **Abbildung 67** ab B_10 bzw. A_08 zu erkennen). Die produktbezogenen Themen wurden dokumentiert und über den etablierten Problemlösungsprozess an die Entwicklerteams gemeldet. Aufgrund des zeitlichen und organisatorischen Rahmens der Studie war es jedoch nicht möglich sie innerhalb der Laufzeit der Untersuchung zu korrigieren bzw. die Anpassungen hinsichtlich der Lösungswirksamkeit zu evaluieren.

7.5 Fazit

Durch die Anwendung der, in dieser Arbeit konzipierten Vorgehensweise und des entwickelten Assistenzsystems lässt sich in der untersuchten Umgebung eine Verkürzung der Durchlaufzeit von etwa 30 – 40 % gegenüber dem etablierten Vorgehen erzielen. Die mehr als halbierte Standardabweichung deutet dabei auf einen signifikant stabileren und berechenbareren Produktionsablauf hin. Da das System einigen Arten von Montagefehlern vorbeugt, konnte die Nacharbeit gegenüber der Referenzgruppe um 68 % reduziert werden. Die Erfassung von detaillierten Daten zu Montagefortschritt und -Ablauf ersetzt einerseits die papierbasierte Dokumentation und ermöglicht andererseits eine Überwachung der Montage in Echtzeit. Die gesteigerte Transparenz wiederum eröffnet neue Möglichkeiten, um die Produktion hinsichtlich Engpässe und Optimierungspotenzialen zu analysieren. Um eine Entscheidung für oder gegen die Weiterentwicklung hin zu einer produktiven Anwendung treffen zu können, müssen die dargestellten Vorzüge den Kosten und dem Aufwand für Mitarbeiterqualifizierung, Entwicklung und Betrieb eines solchen Systems sowie potenziellen Risiken gegenübergestellt werden. Da diese Faktoren sehr stark vom jeweiligen Unternehmen abhängig sind, kann in dieser Arbeit keine allgemeine Aussage hierzu getroffen werden.

Im Hinblick auf eine positive Beeinflussung nachfolgender Phasen des Serienentwicklungsprozesses können lediglich qualitative Aussagen getroffen werden. Die im Folgenden beschriebenen Beobachtungen untermauern die Hypothesen, wonach auch in diesem Bereich mit vorteilhaften Auswirkungen gerechnet werden kann, eine quantitative Bewertung ist auf Basis der Untersuchung jedoch nicht möglich. Die Reife der geplanten Montageabläufe konnte in vergleichsweise kurzer Zeit deutlich gesteigert werden. Dadurch wird das Risiko minimiert in späteren Phasen auf Probleme mit potenziell ungünstigen Auswirkungen zu stoßen. Um einen möglichst reibungslosen Anlauf und eine stabile Serienproduktion von hoher Qualität zu erreichen, ist es erforderlich die konzeptionellen Schwächen bis zur Übergabe an das Serienwerk weitgehend zu lösen.

Auch wenn insbesondere einige der das Produktkonzept betreffenden Defizite recht offensichtlich sind, trägt der strukturierte Bewertungsansatz dazu bei, Missverständnisse und das Übersehen vermeintlich unwichtiger Details zu vermeiden. Ohne das Assistenzsystem und das durch seine Anwendung unterstützte stringente Vorgehen wäre eine derart detaillierte Evaluation der geplanten Serienprozesse zu diesem Zeitpunkt kaum bzw. nur mit einem enormen personellen und zeitlichen Aufwand (z.B. Vorbereitung eines Absicherungsworkshops) möglich gewesen. Es ist schwierig die Kritikalität der identifizierten Defizite zu bewerten oder die potenziellen Auswirkungen im Falle einer erst später oder gar nicht erfolgenden Korrektur

abzuschätzen. Wie Eingangs in der Motivation (Kapitel 1.1) dargelegt, ist es im Allgemeinen jedoch ratsam, derartige Themen frühzeitig zu adressieren, da späte Änderungen in der Regel signifikant höhere Kosten und Mehraufwand verursachen. Zudem wird durch die systematische und auf vorhergehenden Erkenntnissen aufbauende Reife- und Qualitätsbewertung der Aufwand für die aktuell in Form von Expertenworkshops organisierte vollumfängliche Bewertung der Serientauglichkeit vor dem SoP deutlich reduziert. Es ist stets transparent, wann, durch wen und in welchem Rahmen welcher Aspekt eines Entwicklungsstands bewertet wurde. Sofern sich keine Änderungen an diesem Stand ergeben haben, ist keine erneute Bewertung erforderlich. Die Verwender der Prototypen profitieren von einer höheren Transparenz und umfangreicheren Dokumentation, die beispielsweise bei der Fehleranalyse hilfreich sein kann. Die optimierten und mit Hinweisen sowie Fotos und Videos aus dem Prototypenbau angereicherten Arbeitsanweisungen bieten eine solide Ausgangsbasis für die Qualifikation der Serienmitarbeiter. Eine entsprechende Erweiterung der Funktionalität des Systems hin zu einem hybriden oder virtuellen Werkertraining wurde mehrfach durch Experten aus dem Serienumfeld angeregt und ist durchaus denkbar.

8 Diskussion und Ausblick

Das in dieser Arbeit untersuchte Konzept ein Assistenzsystem in der Prototypenmontage einzusetzen, um einerseits die Montage der Prototypen selbst zu optimieren aber auch, um eine systematische Montageprozessabsicherung zu ermöglichen, zielt auf ebendiese effiziente und durchgängige Datennutzung ab. Dem Ansatz liegt die Annahme zugrunde, dass von einer besseren Informationsverfügbarkeit, einer höheren Qualität der Information und einem beschleunigten Informationsaustausch die Werker in der Montage ebenso wie die Ingenieure, Planer und Konstrukteure in den Entwicklungsabteilungen profitieren. Durch eine bessere Integration der Domänen soll die Zusammenarbeit verbessert und eine iterative Optimierung in schnellen Zyklen ermöglicht werden.

Spät im Entwicklungsprozess erkannte Defizite und dadurch erforderliche Änderungen werden in der Literatur häufig als wesentlicher Faktor für Verzögerungen und Kostensteigerungen genannt. Der Ansatz sieht daher vor, durch eine systematische, produktionsbegleitende Evaluierung die Montageprozessabsicherung zu optimieren, um eine frühzeitige Erkennung und Behebung von Defiziten zu gewährleisten. Dadurch soll die Reife frühzeitig gesteigert, der Serienanlauf vereinfacht und die Erreichung der Produktionsziele sichergestellt werden.

Zunächst wurden in dieser Arbeit die Grundlagen der heute existierenden Serienproduktion in der Automobilindustrie sowie der Stand der Technik und die Abläufe in der Montageplanung und Prototypenproduktion vorgestellt (Kapitel 2). Dabei wurde auch auf die wesentlichen Trends in diesem Umfeld eingegangen, die in Anlehnung an die industriellen Revolutionen unter dem Begriff „Industrie 4.0“ zusammengefasst werden. Anschließend wurden aus der Literatur potenzielle Problemfelder und Optimierungspotenziale in der Serienentwicklung zusammengetragen und Problemhypothesen formuliert (Kapitel 3). Diese wurden auf Basis einer Fallstudie in der Praxis überprüft und konkretisiert. Durch einen Abgleich mit dem Stand der Wissenschaft, der durch eine strukturierte Literaturrecherche etabliert wurde, konnte eine konkrete Zielsetzung für die Arbeit in Form von drei Forschungsfragen formuliert werden:

- 1) Wie kann die produkt- und produktionsbezogene Prozessabsicherung und die Ressourcenabsicherung während der Prototypen- und Vorserienmontage gestaltet werden?
- 2) Wie kann ein Assistenzsystem die Absicherung in der Prototypenmontage unterstützen?
- 3) Wie muss ein Montageassistenzsystem gestaltet sein, damit es sich für den Einsatz in der Prototypenmontage eignet und welche Voraussetzungen müssen gegeben sein bzw. wie können diese geschaffen werden?

Die erste Frage wurde im Rahmen der Methodenkonzeption (Kapitel 4.1 und 4.2) ausführlich beleuchtet. Dabei wurden zunächst die Gestaltungsmöglichkeiten bei der Absicherung aufgezeigt, die Entwicklung des Reifegrads modelliert und die Begriffe Betrachtungsumfang (horizontale Testabdeckung) und Betrachtungstiefe (vertikale Testabdeckung) eingeführt.

Anschließend wurden übliche Absicherungsmethoden vorgestellt, diskutiert und anhand der jeweiligen Testabdeckung und ihrer Eignung für bestimmte Projektphasen klassifiziert. Abgerundet wurde die Bearbeitung der ersten Fragestellung durch die Sammlung absicherungsrelevanter Aspekte und Eigenschaften.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen und vor dem Hintergrund der im dritten Kapitel analysierten Praxisdefizite wurden im Abschnitt 4.3 Anwendungsmöglichkeiten für Assistenzsysteme und die daraus potenziell resultierenden Vorteile diskutiert und damit die zweite Forschungsfrage beantwortet. Im Wesentlichen wurden dabei zwei Anwendungsbereiche identifiziert: Einerseits kann ein Montageassistenzsystem den Werkern im Prototypenbau stets aktuelle Informationen zum geplanten Serienprozess anzeigen und ihnen so ermöglichen diesen systematisch zu erproben. Dabei können auch Änderungen an den geplanten Prozessen transparent und effizient (da automatisiert) kommuniziert werden. Andererseits kann ein Assistenzsystem als Kommunikationsmittel genutzt werden, um Erkenntnisse aus der Produktion effizient an die Entwicklungs- und Planungsabteilungen zurückzuliefern. Um darzustellen, wie dadurch ein Beitrag zur Erreichung der übergeordneten Zielsetzung (vgl. Kapitel 1.1) geleistet werden kann, wurden drei Lösungshypothesen formuliert (Kapitel 4.4). Für diese wurden wiederum Erfolgskriterien definiert, anhand derer das Forschungsergebnis abschließend überprüft werden soll.

Basierend auf dieser Analyse wurde in Abschnitt 4.5. ein Grobkonzept für die Absicherungsmethode und das, sie unterstützende Assistenzsystem entworfen. Die Methode zielt darauf ab, mittels eines Assistenzsystems eine kontinuierliche, produktionsbegleitende Absicherung der geplanten Montageprozesse zu ermöglichen. Dadurch, dass sie (in einem gewissen Maß) die Einhaltung der geplanten Abläufe erzwingt, führen Defizite in diesen zwangsläufig zu Problemen bei der Montage. Diese sollen über eine, in das Assistenzsystem integrierte Funktionalität zur Problemmeldung effizient an die zuständigen Planer gemeldet werden. Durch eine Anreicherung der Meldung mit den, im System vorhandenen Daten zur Montagesituation soll dabei einerseits der Aufwand für die Meldung reduziert und andererseits die Qualität bzw. der Informationsgehalt der Meldung maximiert werden, um das Problemverständnis beim Empfänger und dadurch eine schnelle Problemlösung zu begünstigen und Rückfragen zu minimieren. Als drittes Element wurde eine Prozessbewertung konzipiert, die es ermöglichen soll, auch weniger offensichtliche Defizite systematisch zu identifizieren.

Die dritte Fragestellung wurde durch die Ausarbeitung der Methode (Kapitel 5) sowie die Entwicklung und prototypische Entwicklung eines entsprechenden Assistenzsystems (Kapitel 6) exemplarisch beantwortet. Um die theoretischen Ausführungen zu untermauern, die Anwendbarkeit der konzipierten Methode sowie die Tauglichkeit des entwickelten Assistenzsystems zu demonstrieren und das Ergebnis hinsichtlich der im Abschnitt 4.4 formulierten Lösungshypothesen überprüfen zu können, wurde abschließend eine Studie in einer realen industriellen Umgebung durchgeführt (Kapitel 7).

An dieser Stelle soll nun das Ergebnis der Arbeit noch einmal kritisch betrachtet und den zu Beginn der Entwicklung definierten Erfolgskriterien (vgl. Abschnitt 4.4) gegenübergestellt werden, bevor abschließend ein Ausblick auf Möglichkeiten zur Weiterentwicklung und weitergehenden Forschung gegeben wird.

Erfolgskriterien bezüglich der Absicherungseffizienz:

- E1.1) Die Lösung muss es erlauben, die für die Serie geplanten Prozesse möglichst akkurat im Umfeld der Prototypenmontage anzuwenden, um eine valide Erprobung und Bewertung zu ermöglichen.

Wie im Rahmen der Studie gezeigt werden konnte, lässt sich diese Anforderung mit der entwickelten Lösung weitestgehend umsetzen. Limitationen entstehen primär durch das physische Umfeld im Prototypenbau, in dem aus wirtschaftlichen Gründen meist noch nicht alle Betriebsmittel, Sonderwerkzeuge und Vorrichtungen verfügbar sind, weshalb bei betreffenden Montageschritten auf die, ebenfalls für die Serie geplanten manuellen Notfallprozesse ausgewichen werden muss.

- E1.2) Die Lösung muss die Einhaltung der Vorgaben kontrollieren bzw. Abweichungen dokumentieren. Dabei muss eine gewisse Flexibilität erhalten bleiben.

Auch diese Anforderung konnte erfüllt werden. Durch die, in das Assistenzsystem integrierten Mechanismen kann in bestimmten Problemsituationen geregelt und dokumentiert von dem vorgegeben Prozess abgewichen werden, beispielsweise kann die Reihenfolge der Prozessschritte angepasst werden. Dabei wurde die Flexibilität im Vergleich zum heute etablierten Modell in einigen Freiheitsgraden bewusst eingeschränkt, um einige etablierte, jedoch ungünstige bzw. unerwünschte Vorgehensweisen zu unterbinden.

- E1.3) Durch die Anwendung der Lösung dürfen weder Verzögerungen noch personeller Mehraufwand verursacht werden.

Wie die Auswertung der Durchlaufzeiten bei der Studie gezeigt hat, sinken diese bei der Anwendung der entwickelten Lösung nach einer initialen Anlernphase im Vergleich zum etablierten Modell deutlich. Dies ist im Wesentlichen auf die strukturiertere und effizientere Arbeitsweise sowie die Vermeidung von Fehlern zurückzuführen.

- E1.4) Bei Anwendung der Methode muss sich in der Praxis ein substanzieller Absicherungsgrad (horizontale und vertikale Testabdeckung) erzielen lassen.

Insbesondere in den frühen Phasen der Prototypenproduktion, wenn es um die Bestätigung der Produkt- und Montagekonzepte geht, kann die entwickelte Lösung einen substanziellen Beitrag zur Absicherung leisten. In der Studie konnte demonstriert werden, dass ein frühzeitig investierter Mehraufwand zur Prüfung, Absicherung und ggf. Korrektur bzw. Optimierung der Abläufe zu einer deutlichen Steigerung der Reife, stabileren Montageabläufen und damit in Summe zu einer signifikanten Effizienzsteigerung führt. In späteren Phasen, mit zunehmender Nähe zur Serie, hängt der erreichbare Absicherungsgrad wesentlich vom Umfeld und den verfügbaren Bauteilen bzw. der Konfiguration der zu montierenden Prototypenfahrzeuge ab. Im betrachteten Unternehmen wurde aus diesem Grund im Prototypenwerk ein spezieller Bereich eingerichtet, der mit serienähnlicher Förder- und Anlagentechnik ausgestattet ist. In diesem können die Prototypen der späteren Phasen unter Simulation der Serienumgebung montiert werden, sofern die grundlegenden Abläufe im Vorfeld zu einer ausreichenden Reife gebracht wurden.

E1.5) Der Absicherungsgrad muss jederzeit Transparent und quantifizierbar sein.

In dieser Arbeit wurden für die Bewertung und Darstellung der Reife und des Absicherungsgrads zunächst der Ansatz verfolgt, in das Assistenzsystem selbst eine entsprechende Auswertung und Anzeige zu integrieren. Dabei wurden lediglich die Daten aus dem Assistenzsystem bzw. aus der Prototypenmontage herangezogen. Für eine produktive Umsetzung scheint es retrospektive aufgrund der für das gesamte Fahrzeugprojekt höheren Aussagekraft sinnvoller, die Daten aus dem Assistenzsystem in eine überlagerte, phasenübergreifend Absicherungsmanagement-Lösung einzuspeisen und dort mit den Ergebnissen anderer Absicherungsmaßnahmen zu verknüpfen, wie beispielsweise der vorgelagerten virtuellen Absicherung. Grundsätzlich liefert die entwickelte Lösung jedoch alle wesentlichen Daten, die für eine Bestimmung des Absicherungsgrades und eine Bewertung der Reife bzw. des Projektfortschritts erforderlich sind. Zudem wurde in dieser Arbeit eine Methode für die Berechnung entsprechender Kennzahlen aus diesen Daten vorgestellt.

E1.6) Die Methode muss zuverlässig valide Absicherungsergebnisse liefern.

Die Erfüllung dieser Anforderung kann auf Basis der durchgeführten Studie aufgrund des begrenzten Studienumfangs nicht abschließend beurteilt werden. Die Beobachtungen der Studie rechtfertigen zwar keine gegensätzlichen Annahmen, jedoch wäre für eine aussagekräftige Bewertung ein umfassender, flächendeckender Einsatz der Vorgehensweise in einem Fahrzeugprojekt erforderlich.

Erfolgskriterien für die Optimierung der Serienentwicklung

E2.1) Aus den Planungsdaten der Serienmontageplanung muss automatisiert ein Prozess abgeleitet werden, der die Eigenheiten und spezifischen Umfänge der Prototypen berücksichtigt, sich im Umfeld der Prototypenmontage anwenden lässt und dabei so wenig wie möglich von dem für die Serie geplanten Ablauf abweicht. (...)

Im Rahmen der Ausarbeitung der Methode wurde dargestellt, wie sich dies realisieren lässt. Durch die Implementierung und Anwendung in der Studie wurde die Machbarkeit demonstriert.

E2.2) Die Methode muss dazu führen, dass Defizite systematisch und frühzeitig erkannt werden. Die Dauer zwischen der Einführung eines neuen Prozesses oder einer neuen Variante, der erstmaligen Bewertung und der Meldung eines Defizits (oder der Bestätigung) muss daher im Vergleich zu den heute etablierten Absicherungsmethoden sinken. (...) Während der Vorserie und dem Hochlauf sollten keine Defizite mehr auftreten, deren Erkennung im Umfeld der Prototypenmontage möglich gewesen wäre.

Grundsätzlich ist die Vorgehensweise so ausgelegt, dass die systematische Erkennung und Meldungen von Defiziten ermöglicht und im Vergleich zu den etablierten Methoden stark vereinfacht und begünstigt wird. Jedoch konnte dieser Aspekt im Rahmen der Validierung aufgrund des begrenzten Umfangs der Studie nur unzureichend überprüft werden. Ob die Anwendung der vorgeschlagenen Methode am Ende der Serienentwicklung tatsächlich zu einer höheren Reife führt und damit einen reibungslosen Anlauf der Serienentwicklung ermöglicht, kann daher Basis der durchgeführten Studie nicht abschließend bewertet werden. Hierfür wäre eine Anwendung im größeren Maßstab erforderlich.

Bei der praktischen Anwendung hat sich zudem gezeigt, dass die Bereitschaft zu einer gewissenhaften Bewertung der Abläufe und zur Meldung von Defiziten sehr stark von der individuellen Motivation und Erfahrung des Werkers abhängt

- E2.3) Der Aufwand für die Meldung von Defiziten sollte auf ein Minimum reduziert werden. Eine Meldung muss dennoch alle potenziell für die Analyse und Behebung des Problems relevanten Informationen in anschaulicher Weise umfassen, um das Problemverständnis beim Empfänger zu begünstigen, den Kommunikationsaufwand durch Rückfragen zu reduzieren und eine schnelle, nachhaltige Lösung zu ermöglichen. Eine direkte Adressierung an den Lösungsverantwortlichen ist dabei wichtig, um den Prozess nicht unnötig zu verzögern. (...)

Eine Integration in ein Problemmanagement-Lösung des betrachteten Unternehmens war im Rahmen dieser Arbeit nicht machbar, daher konnte dieser Aspekt nicht vollständig überprüft werden. Jedoch wurde die entwickelte Funktionalität genutzt, um die 83 entdeckten Defizite zu dokumentieren und entsprechende Berichte zu generieren, die anschließend manuell an die (vorab über die Studie informierten) Mitarbeiter zugestellt wurden, die das System als verantwortliche identifiziert hat. Von den Werkern wurde die Funktionalität dabei aufgrund der intuitiven Gestaltung der Problemklassifizierung und des geringen Aufwands sehr positiv bewertet.

Auch die Empfänger äußerten sich weitgehend positiv über die Qualität der Meldungen. Lediglich in zwei Fällen wurden Meldungen falsch adressiert, was auf Fehler in den durch die Planung hinterlegten Zuständigkeiten zurückzuführen war. Gelegentlich wurde auf der Empfängerseite die Sorge geäußert, dass ein derartiges System bei einem flächendeckenden, produktiven Einsatz zu einer großen Menge an Meldungen und damit einer Verschlechterung der heute etablierten Kennzahlen führen könnte. Die im jeweiligen Unternehmen etablierte (Fehler-)Kultur scheint daher einen wesentlichen Faktor für den praktischen Erfolg eines derartigen Ansatzes darzustellen.

- E2.4) Als Indikator für eine schnelle, frühzeitige Reifesteigerung im Rahmen eines Entwicklungszyklus müsste sich nach der Einführung eines neuen Konstruktions- bzw. Planstands ein kurzfristiger Anstieg der Problemmeldungen zeigen, der rasch abnimmt und bis zur nächsten Änderung auf niedrigem Niveau bleibt (angestrebter Verlauf in **Abbildung 30**). Bei einer Betrachtung der gesamten Prototypenphase sollte die Zahl der Problemmeldungen früher ihr Maximum erreichen und mit zunehmendem Entwicklungsfortschritt sinken. Weniger ausgeprägte Spitzen im Verlauf der Anzahl eingehender Problemmeldungen können auf kontinuierlichere Entwicklungszyklen mit geringerem Änderungsumfang hindeuten.

Auch diese Anforderung konnte aufgrund des begrenzten zeitlichen Umfangs der Studie nicht valide geprüft werden.

- E2.5) Auf Basis des Absicherungsgrades (vgl. E1.5) und der bekannten Defizite soll eine automatisierte und valide Reifegradmessung realisiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine entsprechende Messung und Darstellung der Testabdeckung und des Reifegrades auf Basis der in der Prototypenmontage generierten Daten

rudimentär implementiert. Die Aussagekraft der entwickelten Metriken konnte jedoch wiederum aufgrund des begrenzten Studiumumfangs nicht bewertet werden.

Erfolgskriterien für die Optimierung der Prototypenmontage

E3.1) Bei Anwendung der Lösung lässt sich die Durchlaufzeit in der Montage reduzieren.

Die in der Studie beobachtete Effizienzsteigerung lag mit einer Reduzierung der Durchlaufzeit um über 30 % trotz des zunächst erforderlichen Trainings der Werker im Umgang mit dem Assistenzsystem und der Absicherungstätigkeit deutlich über dem erwarteten Ausmaß. Ob sich ähnliche Werte bei einem großflächigen Einsatz auch in anderen Montagebereichen erzielen lassen, kann jedoch nicht beurteilt werden.

E3.2) Die zur Behebung erkannter Fehler / Defekte erforderliche Nacharbeit sinkt.

Die Vermeidung von Montagefehlern stellte einen wesentlichen Aspekt bei der Reduzierung der Durchlaufzeit dar.

E3.3) Die resultierende Produktqualität (im Sinne unentdeckter Fehler / Abweichungen) sowie die Seriennähe (Aufbau entsprechend der geplanten Prozesse unter Anwendung der vorgegebenen Parameter) steigen. Die Erprobungstauglichkeit der Fahrzeuge bzw. die Validität der mit ihnen durchgeführten Versuche steigt.

Insbesondere durch die flächendeckende Nutzung digitaler Betriebsmittel (EC-Schraubsysteme) konnte eine deutliche Qualitätssteigerung erreicht werden. Die Beobachtungen legen zudem nahe, dass mit der entwickelten Vorgehensweise einige Fehler vermieden bzw. entdeckt und behoben wurden, die mit der etablierten Arbeitsweise unentdeckt geblieben wären.

E3.4) Unvorhergesehene Verzögerungen treten seltener und in geringerem Maße auf.

Die im Rahmen der Studie beobachteten, deutlich geringeren Schwankungen in der Durchlaufzeit stellen einen deutlichen Hinweis auf eine Stabilisierung der Montageabläufe dar. Verzögerungen waren dabei seltener und in geringerem Ausmaß zu beobachten.

E3.5) Ohne zusätzlichen manuellen Aufwand kann eine vollständige Dokumentation des Versuchsfahrzeugs und seines Montageprozesses erzeugt werden.

Auf Basis der, durch das Assistenzsystem erfassten Daten konnte eine äußerst umfassende Dokumentation des Montageablaufs einschließlich der Ist-Parameter generiert werden. Da diese jedoch aufgrund des prototypischen Charakters der Lösung nicht den regulatorischen Anforderungen genügen konnte, musste im Rahmen der Studie die manuelle, papierbasierte Dokumentation nach dem etablierten Modell dennoch erfolgen. Eine entsprechende Zeiterparnis konnte daher nicht direkt nachgewiesen werden.

E3.6) Die Lösung steigert die Transparenz in der Montage, beispielsweise indem Montagefortschritt und Durchlaufzeiten für jedes Fahrzeug sowie Kennzahlen zu den Arbeitsstationen erfasst und dargestellt werden können.

Bei einem flächendeckenden Einsatz würden die, durch die Anwendung der entwickelten Lösung generierten Daten eine Verfolgung und Überwachung der Montageabläufe in Echtzeit ermöglichen. In dieser Arbeit wurde eine entsprechende Auswertung und Anzeige von

Kennzahlen zwar rudimentär realisiert. Da der Einsatz im Rahmen der Studie jedoch auf einen einzelnen Arbeitsplatz begrenzt war, konnte der tatsächliche praktische Nutzen mangels Datenverfügbarkeit nicht demonstriert werden. Jedoch konnten auf Basis der Daten des einzelnen Arbeitsplatzes bereits einige Erkenntnisse gewonnen und entsprechende Optimierungen umgesetzt werden, insbesondere im Bereich der Tagesprogrammplanung und der Zusammenarbeit mit der Logistik.

Zusammenfassend konnte die grundsätzliche Anwendbarkeit der, in dieser Arbeit entwickelten Methode zur produktionsbegleitenden Absicherung von Montageprozessen im Prototypenbau mithilfe eines Montageassistenzsystems gezeigt werden. Die Realisierbarkeit einer entsprechenden technischen Lösung für den betrachteten Bereich mit seinen individuellen Anforderungen wurde ebenfalls demonstriert. Zudem konnte die Tauglichkeit im Sinne einer positiven Auswirkung auf die übergeordneten Zielsetzungen durch die Anwendung im Rahmen einer Studie in einer produktiven Industrieumgebung nachgewiesen werden. Dabei konnten sehr positive Ergebnisse im Hinblick auf die Absicherungseffizienz und die Optimierung der operativen Abläufe in der Prototypenmontage (Signifikante Reduzierung der Durchlaufzeit, Stabilisierung der Montageabläufe, Vermeidung von Fehlern) beobachtet werden.

Hinsichtlich der erzielbaren Absicherungsgüte und der angestrebten Auswirkungen auf die Serienentwicklung konnten einige Indikatoren für positive Effekte beobachtet werden. Für eine aussagekräftige Bewertung wäre jedoch eine Studie in größerem Maßstab über ein gesamtes Fahrzeugprojekt erforderlich. Auch die vorgeschlagene Vorgehensweise zur Bestimmung der Testabsicherung bzw. des Absicherungsgrads und darauf aufbauend die Reifegradbewertung konnten lediglich in Grundzügen betrachtet werden.

Da die Methode im Rahmen der Evaluation lediglich in einer Montagezone angewendet wurde, hat sich aus dem beschleunigten Ablauf keine unmittelbare Auswirkung auf die Reife und den Terminplan des Fahrzeugprojekts ergeben. Sofern sich der Ansatz auf andere Abschnitte der Montage übertragen lässt und sich dort ähnliche Ergebnisse zeigen, könnte die Prototypenphase jedoch in Summe deutlich verkürzt und ihr Beitrag zur Serienentwicklung qualitativ verbessert werden. Da die Versuchsfahrzeuge dann für die Entwicklungsbereiche früher und in höherer Güte zur Verfügung stehen und alle nachfolgenden Aktivitäten entsprechend vorgezogen werden könnten, würde sich dies direkt auf die Dauer der Serienentwicklung und damit auch die Kosten dieser auswirken.

Im nächsten Schritt ist daher zu untersuchen, inwieweit sich die Lösung in anderen Montagebereichen anwenden lässt. Während das System in vergleichbaren Vormontagezonen wie beispielsweise der Tür- und der Frontend-Montage direkt einsetzbar sein sollte, müssten für komplexere Szenarien der Hauptlinie einige zusätzliche Anforderungen berücksichtigt werden. Da sich die Monteure in diesen Bereichen in der Regel nicht stationär vor dem Montageobjekt befinden, sondern sich auf einer größeren Fläche in und um das Fahrzeug bewegen, müssen für Informationsbereitstellung und Interaktion alternative Lösungen wie beispielsweise Sprach- oder Gestensteuerung, *augmented-reality* Lösungen oder Projektionen integriert werden.

Weiterhin müsste erforscht werden, welche Ergebnisse im Hinblick auf die Serienentwicklung bei einem langfristigen Einsatz erzielt werden können. Dabei wäre zu prüfen, ob sich durch

einen umfassenden Einsatz der Lösung in der Praxis die angestrebte iterative Optimierung in schnellen Zyklen und die damit einhergehende frühzeitige Reifesteigerung tatsächlich erreichen lässt. Auch die vorgeschlagene Methode zur Reifegradbewertung müsste hinsichtlich ihrer praktischen Eignung und Aussagekraft evaluiert werden. Um über das gesamte Entwicklungsprojekt eine Transparenz zum Absicherungsstand und der Serienreife herzustellen, sollte eine phasenübergreifende Absicherungsmanagement-Lösung entwickelt werden, wie sie auch von M. Müller vorgeschlagen wurde [58]. Ein solches System müsste Daten und Ergebnisse aus allen Phasen und Absicherungsmaßnahmen bündeln und auswerten. Das in dieser Arbeit konzipierte Assistenzsystem könnte als eine Datenquelle für eine solche Lösung fungieren. In diesem Kontext sollte auch versucht werden, für die im Abschnitt 5.4.2 geschilderten Herausforderungen hinsichtlich der Bestimmung abzusichernder Varianten und Änderungsstände adäquate Lösungen zu finden.

9 Literaturverzeichnis

- [1] C. Zapata und P. Nieuwenhuis: „Exploring innovation in the automotive industry: New technologies for cleaner cars“, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 18, Nr. 1, S. 14–20, 2010, DOI: 10.1016/j.jclepro.2009.09.009
- [2] E. P. Stringham, J. K. Miller und J. R. Clark: „Overcoming Barriers to Entry in an Established Industry: Tesla Motors“, *California Management Review*, Jg. 57, Nr. 4, S. 85–103, 2015, DOI: 10.1525/cmr.2015.57.4.85
- [3] A. Schulze, J. Paul MacDuffie und F. A. Taube: „Knowledge generation and innovation diffusion in the global automotive industry: Change and stability during turbulent times“, *Industrial and Corporate Change*, Jg. 24, Nr. 3, S. 603–611, 2015, DOI: 10.1093/icc/dtv015
- [4] S. Peters, J.-H. Chun und G. Lanza: „Digitalization of automotive industry – scenarios for future manufacturing“, *Manufacturing Rev.*, Jg. 3, S. 1, 2016, DOI: 10.1051/MFREVIEW/2015030
- [5] U. Dombrowski, J. Wullbrandt und P. Krenkel: „Industrie 4.0 in production ramp-up management“, *Procedia Manufacturing*, Jg. 17, S. 1015–1022, 2018, DOI: 10.1016/j.promfg.2018.10.085
- [6] H.-P. Wiendahl, H. A. ElMaraghy, P. Nyhuis, M. Zäh, N. Duffie und M. Brieke: „Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation“, *CIRP Annals*, Jg. 56, Nr. 2, S. 783–809, 2007, DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.003
- [7] M. Kropik: *Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009
- [8] G. Schuh, W. Stölzle und F. Straube, Hg.: *Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen: Ein Leitfaden für die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008
- [9] X. Zhu, S. J. Hu, Y. Koren und S. P. Marin: „Modeling of Manufacturing Complexity in Mixed-Model Assembly Lines“, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Jg. 130, Nr. 5, 2008, Art. no. 051013, DOI: 10.1115/1.2953076
- [10] D. E. Whitney: *Mechanical assemblies: Their design, manufacture, and role in product development*. New York: Oxford University Press, 2004
- [11] G. Michalos, S. Makris, N. Papakostas, D. Mourtzis und G. Chryssolouris: „Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Jg. 2, Nr. 2, S. 81–91, 2010, DOI: 10.1016/j.cirpj.2009.12.001
- [12] P. Milling und J. Jürging: „Der Serienanlauf in der Automobilindustrie: Technische Änderungen als Ursache oder Symptom von Anlaufschwierigkeiten?“ in *Gabler Edition Wissenschaft, Spektrum des Produktions- und Innovationsmanagements: Komplexität und Dynamik im Kontext von Interdependenz und Kooperation*, F. Himpel, Hg., 1 Aufl., Wiesbaden: Gabler, 2008
- [13] S. Elstner und D. Krause: „Methodical Approach for Consideration of Ramp-up Risks in the Product Development of Complex Products“, *Procedia CIRP*, Jg. 20, S. 20–25, 2014, DOI: 10.1016/j.procir.2014.05.027
- [14] M. Hesse und C. Weber: „Manufacturability and validation methods in passenger car development – An industrial case study“ in *Proceedings of the DESIGN 2012 12th International Design Conference*, Zagreb, Kroatien, 2012, S. 929–936

- [15] B. Bertsche: Reliability in automotive and mechanical engineering: Determination of component and system reliability. Berlin: Springer, 2008
- [16] M. Otto, M. Prieur, P. Agethen und E. Rukzio: „Dual Reality for Production Verification Workshops: A Comprehensive Set of Virtual Methods“, *Procedia CIRP*, Jg. 44, S. 38–43, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.140
- [17] D. R. Flick: „Virtuelle Absicherung manueller Montagevorgänge mittels digitalem 3D Menschmodellen: Optimierung der Mensch-Computer-Interaktion“. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München TUM, München, 2010
- [18] A. Albers, M. Behrendt, S. Klingler und K. Matros: „Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess“ in *Handbuch Produktentwicklung*, U. Lindemann, Hg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016, S. 541–569, DOI: 10.3139/9783446445819.019
- [19] M. Markus, A. Majchrzak und L. Gasser: „A Design Theory for Systems That Support Emergent Knowledge Processes“, *MIS Quarterly*, Jg. 26, S. 179–212, 2002, DOI: 10.2307/4132330
- [20] S. March und G. F. Smith: „Design and natural science research on information technology“, *Decision Support Systems*, Jg. 15, Nr. 4, S. 251–266, 1995, DOI: 10.1016/0167-9236(94)00041-2
- [21] J. F. Nunamaker, M. Chen und T. D. Purdin: „Systems Development in Information Systems Research“, *Journal of Management Information Systems*, Jg. 7, Nr. 3, S. 89–106, 1990, DOI: 10.1080/07421222.1990.11517898
- [22] A. Hevner, S. March, J. Park und S. Ram: „Design Science in Information Systems Research“, *MIS Quarterly*, Jg. 28, S. 75–105, 2004
- [23] H. A. Simon: The sciences of the artificial, 1. Aufl. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1969
- [24] L. T. Blessing und A. Chakrabarti: DRM, a Design Research Methodology. London: Springer, 2009
- [25] A. Kampker, R. Förstmann, M. Ordnung und A. Haunreiter: „Prototyping in the Agile Development Management“, *ATZextra*, Jg. 118, 7-8, S. 66–70, 2016, DOI: 10.1007/s38311-016-0074-9
- [26] B. Lotter und W. Schilling: Manuelle Montage: Planung - Rationalisierung - Wirtschaftlichkeit. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994
- [27] H.-J. Warnecke: Der Produktionsbetrieb 1
- [28] E. Ojabarian: „Die strategische Gestaltung der Fertigungstiefe: Ein systemorientierter Ansatz am Beispiel der Automobilindustrie“, Wiesbaden
- [29] J. Fisel: „Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme: Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage“, Aachen
- [30] S. Pischinger und U. Seiffert, Hg.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer, 2016
- [31] T. Jesse: „Herausforderungen und Konzepte für die Großserien-Kraftfahrzeugendmontage der Zukunft“, 2017
- [32] F. Klug: Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010
- [33] G. Spur und T. Stöferle: Fügen, Handhaben und Montieren. München: Hanser, 1986

- [34] Fertigungsverfahren Fügen: Teil 0: Allgemeines, Einordnung, Unterteilung, Begriffe, DIN 08593-0, Deutsches Institut für Normung e.V., Sep. 2003
- [35] B. Lotter und H.-P. Wiendahl: Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis. Berlin: Springer, 2006
- [36] Montage- und Handhabungstechnik: Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole, VDI 2860, Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Mai. 1990
- [37] Einheitliche eHPV-Bewertung in der Fahrzeugzerlegung, VDA 4812, Verband der Automobilindustrie (VDA), Berlin, Apr. 2015
- [38] T. Jeske, K. Hasenau und C. Schlick: „Flexible Arbeitsgestaltung und Lernprozesse in der Montage“ in *Arbeitszeit, Zeitarbeit: Flexibilisierung der Arbeit als Antwort auf die Globalisierung*, M. Bornwasser und G. Zülch, Hg., Wiesbaden: Springer, 2013, S. 346–359
- [39] C. Schlick, T. Jeske, N. Jochems, K. Hasenau und S. Tackenberg: „Untersuchung des Einflusses der informatorischen Reichhaltigkeit von Arbeitsplänen auf die Anlernzeit sensumotorischer Fertigkeiten“ in *Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB), Wandlungsfähige Produktionssysteme*, P. Nyhuis, Hg., Berlin: Gito, 2010, S. 325–344
- [40] T. Jeske, F. Meyer und C. Schlick: „Einfluss der Gestaltung von Arbeitsplänen auf die Anlernzeit sensumotorischer Tätigkeiten“, *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, Jg. 68, Nr. 1, S. 1–6, 2014, DOI: 10.1007/bf03374416
- [41] M. Lušić, C. Fischer, K. Braz, M. Alam, R. Hornfeck und J. Franke: „Static Versus Dynamic Provision of Worker Information in Manual Assembly: A Comparative Study Using Eye Tracking to Investigate the Impact on Productivity and Added Value Based on Industrial Case Examples“, *Procedia CIRP*, Jg. 57, S. 504–509, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.087
- [42] W. Rohmert und J. H. Kirchner: Anlernung sensumotorischer Fertigkeiten in der Industrie. Verb. f. Arbeitsstudien, REFA, e.V, 1969
- [43] P. Johansson, S. Mattsson, L. Moestam und Å. Fast-Berglund: „Multi-variant Truck Production - Product Variety and its Impact on Production Quality in Manual Assembly“, *Procedia CIRP*, Jg. 54, S. 245–250, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.062
- [44] J. Wagner, P. Burggräf, M. Dannapfel und C. Fölling: „Assembly Disruptions: Empirical Evidence in Manufacturing Industry of Germany, Austria and Switzerland“
- [45] W. Tönnes, J. Hegel und E. Westkämper: „Analytical Approach for the Examination of the Feasibility of Rework in Flow Assembly Lines“, *Procedia CIRP*, Jg. 57, S. 492–497, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.085
- [46] G. Pawellek: Ganzheitliche Fabrikplanung. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014
- [47] P. Hoffmann-Berling: „Methoden zur Ermittlung montagerelevanter Eigenschaften in der Automobilindustrie mithilfe von Konnektivitätsgraphen“. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg; Internationaler Fachverlag für Wissenschaft & Praxis; Technische Universität Hamburg, Göttingen
- [48] L. Weyand: „Risikoreduzierte Endmontageplanung am Beispiel der Automobilindustrie“, 2010
- [49] R. Schmitt, Hg.: Anlaufmanagement - Begriffe und Definitionen. Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag, 2015

- [50] D. Fitzek und F. Straube: Management Report zur St. Galler Anlaufmanagementstudie: Logistikorientiertes Management von Serienanläufen: Handlungsfelder und Erfolgskonzepte für Automobilzulieferer. Stadeldeken-Elshheim: Verlag Elisabeth Klock, 2004
- [51] D. Fitzek: Anlaufmanagement in Netzwerken: Grundlagen, Erfolgsfaktoren und Gestaltungsempfehlungen für die Automobilindustrie. Bern: Haupt, 2006
- [52] F. Straube und D. Fitzek: „Herausforderungen und Erfolgsmuster im Anlaufmanagement der Automobilindustrie“ in Bd. 19, *Jahrbuch Logistik*, 2005
- [53] R. Bischoff: Anlaufmanagement: Schnittstelle zwischen Projekt und Serie. Konstanz: Hochschule Konstanz, 2007
- [54] M. Bossmann: Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung. Saarbrücken: LFT, Univ, 2007
- [55] T. Binder, S. Härdl und P. Kohoutek: „Virtuelle Entwicklung des neuen Audi A4“, *ATZextra*, Jg. 12, Nr. 1, S. 34–39, 2007, DOI: 10.1365/s35778-007-0007-8
- [56] T. Breitling *et al.*: „Digitale Prototypen unterstützen Entwicklung“, *ATZextra*, Jg. 14, Nr. 1, S. 162–171, 2009, DOI: 10.1365/s35778-009-0272-9
- [57] K.-J. Wack, T. Bär und S. Straßburger: „Grenzen einer digitalen Absicherung des Produktionsanlaufs“ in *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*, Karlsruhe, 2010
- [58] M. Müller: „Reifegradbasierte Optimierung von Entwicklungsprozessen am Beispiel der produktionsbezogenen Produktabsicherung in der Automobilindustrie“. Dissertation, Universität des Saarlandes, 2007
- [59] M. Wächter, T. Schleicher und A. Bullinger-Hoffmann: „Strukturierter Literatur-Review als Werkzeug der Arbeitswissenschaft“, *Arbeit*, 2018
- [60] T. Bauernhansl, M. ten Hompel und B. Vogel-Heuser: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer, 2014
- [61] S. C. Doltsinis, S. Ratchev und N. Lohse: „A framework for performance measurement during production ramp-up of assembly stations“, *European Journal of Operational Research*, Jg. 229, Nr. 1, S. 85–94, 2013, DOI: 10.1016/j.ejor.2013.02.051
- [62] C. Terwiesch und R. E. Bohn: „Learning and process improvement during production ramp-up“, *International Journal of Production Economics*, Jg. 70, Nr. 1, S. 1–19, 2001, DOI: 10.1016/S0925-5273(00)00045-1
- [63] M. Utting, A. Pretschner und B. Legeard: „A taxonomy of model-based testing“, *STVR*, 04/2006, 2006
- [64] P. Burggräf, T. Weißer und J. Wagner: „Data on the current state of problem solving and improvement during physical product development within complex (manufacturing) systems“, *Data in Brief*, Jg. 23, S. 103851, 2019, DOI: 10.1016/j.dib.2019.103851
- [65] J. vom Brocke, A. Simons, Bjoern Niehaves, K. Riemer, R. Plattfaut und A. Cleven: „Reconstructing the Giant: On the Importance of Rigour in Documenting the Literature Search Process“ in *ECIS 2009*, 2009, S. 2206–2217
- [66] P. A. Winkes und J. C. Aurich: „Method for an Enhanced Assembly Planning Process with Systematic Virtual Reality Inclusion“, *Procedia CIRP*, Jg. 37, S. 152–157, 2015, DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.007
- [67] J. C. Aurich, D. Ostermayer und C. H. Wagenknecht: „Improvement of manufacturing processes with virtual reality-based CIP workshops“, *International Journal of*

- Production Research*, Jg. 47, Nr. 19, S. 5297–5309, 2009, DOI: 10.1080/00207540701816569
- [68] A. Seth, J. M. Vance und J. H. Oliver: „Virtual reality for assembly methods prototyping: a review“, *Virtual Reality*, Jg. 15, Nr. 1, S. 5–20, 2011, DOI: 10.1007/s10055-009-0153-y
- [69] M. Bordegoni, U. Cugini, G. Caruso und S. Polistina: „Mixed prototyping for product assessment: a reference framework“, *IJIDeM*, Jg. 3, Nr. 3, S. 177–187, 2009, DOI: 10.1007/s12008-009-0073-9
- [70] J. Böning, C. Fischer, H. Weckend, F. Döbereiner und J. Franke: „Accuracy and Immersion Improvement of Hybrid Motion Capture based Real Time Virtual Validation“, *Procedia CIRP*, Jg. 21, S. 294–299, 2014, DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.191
- [71] A. Ahmad, S. Darmoul, W. Ameen, M. H. Abidi und A. M. Al-Ahmari: „Rapid Prototyping for Assembly Training and Validation“, *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 48, Nr. 3, S. 412–417, 2015, DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.116
- [72] G. Wöhlke und E. Schiller: „Digital Planning Validation in automotive industry“, *Computers in Industry*, Jg. 56, Nr. 4, S. 393–405, 2005, DOI: 10.1016/j.com-pind.2005.01.010
- [73] K. Wattenberg, K. Mahler, L. Wiehe, T. Breitling, L. Dragon und W. Bauer: „Ohne Prototypen schneller zum Ziel“, *ATZextra*, Jg. 17, Nr. 4, S. 92–96, 2012, DOI: 10.1365/s35778-012-0744-1
- [74] J. Kramer: „Von der Entwicklung in die Serie“, *ATZextra*, Jg. 16, Nr. 3, S. 62–64, 2011, DOI: 10.1365/s35778-011-0560-z
- [75] H. Dyckhoff, M. Müser und T. Renner: „Ansätze einer Produktionstheorie des Serienanlaufs“, *ZfB*, Jg. 82, Nr. 12, S. 1427–1456, 2012, DOI: 10.1007/s11573-012-0631-7
- [76] G. Schuh, T. Gartzen und J. Wagner: „Complexity-oriented ramp-up of assembly systems“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Jg. 10, S. 1–15, 2015, DOI: 10.1016/j.cirpj.2015.05.007
- [77] F. Guoliang, L. Aiping, M. Giovanni, X. Liyun und L. Xuemei: „Operation-based Configuration Complexity Measurement for Manufacturing System“, *Procedia CIRP*, Jg. 63, S. 645–650, 2017, DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.136
- [78] S. Keckl, A. Abou-Haydar und E. Westkämper: „Complexity-focused Planning and Operating of Mixed-model Assembly Lines in Automotive Manufacturing“, *Procedia CIRP*, Jg. 57, S. 333–338, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.058
- [79] R. Refflinghaus und C. Kern: „On the track of human errors - Procedure and results of an innovative assembly planning method“, *Procedia Manufacturing*, Jg. 21, S. 157–164, 2018, DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.106
- [80] T. Engström und P. Medbo: „Data collection and analysis of manual work using video recording and personal computer techniques“, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Jg. 19, Nr. 4, S. 291–298, 1997, DOI: 10.1016/S0169-8141(96)00038-8
- [81] J. Village, F. A. Salustri und W. P. Neumann: „Using action research to develop human factors approaches to improve assembly quality during early design and ramp-up of an assembly line“, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Jg. 61, S. 107–119, 2017, DOI: 10.1016/j.ergon.2017.05.006

- [82] M. Bortolini, M. Faccio, M. Gamberi und F. Pilati: „Motion Analysis System (MAS) for production and ergonomics assessment in the manufacturing processes“, *Computers & Industrial Engineering*, 2018, DOI: 10.1016/j.cie.2018.10.046
- [83] J. Krüger und T. D. Nguyen: „Automated vision-based live ergonomics analysis in assembly operations“, *CIRP Annals*, Jg. 64, Nr. 1, S. 9–12, 2015, DOI: 10.1016/j.cirp.2015.04.046
- [84] B. Gladysz und C. Lysiak: „Light-responsive RFID Tags for Precise Locating of Objects in Manual Assembly Verification Workshops“, *Procedia CIRP*, Jg. 41, S. 951–956, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.095
- [85] J. Yang, E. Kim, M. Hur, S. Cho, M. Han und I. Seo: „Knowledge extraction and visualization of digital design process“, *Expert Systems with Applications*, Jg. 92, S. 206–215, 2018, DOI: 10.1016/j.eswa.2017.09.002
- [86] L. Huertas-Quintero, P. P. Conway, D. M. Segura-Velandia und A. A. West: „Root cause analysis support for quality improvement in electronics manufacturing“, *AA*, Jg. 31, Nr. 1, S. 38–46, 2011, DOI: 10.1108/01445151111104155
- [87] K. Mannar und D. Ceglarek: „Continuous Failure Diagnosis for Assembly Systems using Rough Set Approach“, *CIRP Annals*, Jg. 53, Nr. 1, S. 39–42, 2004, DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60640-4
- [88] P. Burggräf, J. Wagner und T. Weißer: „Knowledge-based problem solving in physical product development—A methodological review“, *Expert Systems with Applications*, Jg. 5, Nr. 100025, 2020, DOI: 10.1016/j.eswax.2020.100025
- [89] J. Angelis und B. Fernandes: „Innovative lean: work practices and product and process improvements“, *Lean Six Sigma Journal*, Jg. 3, Nr. 1, S. 74–84, 2012, DOI: 10.1108/20401461211223740
- [90] D. Scrimieri und S. Ratchev: „Capture and Application of Adaptation Knowledge on Assembly Stations“, *IFAC Proceedings Volumes*, Jg. 46, Nr. 7, S. 87–92, 2013, DOI: 10.3182/20130522-3-BR-4036.00086
- [91] C. Fischer, M. Lušić, J. Bönig, R. Hornfeck und J. Franke: „Shortening Innovation Cycles by Employee Training Based on the Integration of Virtual Validation into Worker Information Systems“, *Procedia CIRP*, Jg. 37, S. 65–70, 2015, DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.090
- [92] F. Duan, J. T. C. Tan, J. G. Tong, R. Kato und T. Arai: „Application of the Assembly Skill Transfer System in an Actual Cellular Manufacturing System“, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Jg. 9, Nr. 1, S. 31–41, 2012, DOI: 10.1109/TASE.2011.2163818
- [93] M. Herterich, C. Peters, A. Neff, F. Uebernickel und W. Brenner: „Mobile Work Support for Field Service: A Literature Review and Directions for Future Research“ in *12. Internationalen Tagung Wirtschaftsinformatik (WI 2015)*, Osnabrück, 2015, S. 134–148
- [94] A. Friedewald, P. S. Halata, M. Nikolaj und H. Lödding: „Die Produktivitätswirkung von Augmented Reality in der Unikatfertigung“ in *Schriftenreihe der Wissenschaftliche Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation (WGAB) e.V.*, Bd. 1, *Megatrend Digitalisierung - Potenziale der Arbeits- und Betriebsorganisation*, C. Schlick, Hg., Berlin: Gito, 2016
- [95] S. Makris, G. Michalos und G. Chryssolouris: „Wireless information system for rotating operators in human-based assembly lines“, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Jg. 28, Nr. 11, S. 1196–1207, 2015, DOI: 10.1080/0951192X.2014.962615

- [96] M. Rice, H. H. Tay, J. Ng, S. K. Selvaraj, C. Lim und E. Wu: „Extraction, Rendering and Augmented Interaction in the Wire Assembly of Commercial Aircraft“ in *2016 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*, Chengdu, China, 2016, S. 349–354, DOI: 10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData.2016.83
- [97] D. Borro Yagüez, J. R. Sanchez Tapia, L. Matey Munoz, J. Servan Blanco, F. Mas Morate und J. Cordero Valle: „Hands-free wearable system for helping in assembly tasks in aerospace“, *DYNA*, Jg. 86, Nr. 3, S. 328–335, 2011, DOI: 10.6036/3906
- [98] R. Müller, M. Vette-Steinkamp, L. Hörauf, C. Speicher und A. Bashir: „Worker centered cognitive assistance for dynamically created repairing jobs in rework area“, *Procedia CIRP*, Jg. 72, S. 141–146, 2018, DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.137
- [99] S. Werrlich, P.-A. Nguyen und G. Notni: „Evaluating the training transfer of Head-Mounted Display based training for assembly tasks“ in *PETRA '18: 11th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, Corfu, Greece, 2018, S. 297–302, DOI: 10.1145/3197768.3201564
- [100] S. Makris, P. Karagiannis, S. Koukas und A.-S. Matthaiakis: „Augmented reality system for operator support in human–robot collaborative assembly“, *CIRP Annals*, Jg. 65, Nr. 1, S. 61–64, 2016, DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.038
- [101] Y. Cohen, M. Faccio, F. G. Galizia, C. Mora und F. Pilati: „Assembly system configuration through Industry 4.0 principles: the expected change in the actual paradigms“, *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 50, Nr. 1, S. 14958–14963, 2017, DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.2550
- [102] M. Krugh und L. Mears: „A complementary Cyber-Human Systems framework for Industry 4.0 Cyber-Physical Systems“, *Manufacturing Letters*, Jg. 15, S. 89–92, 2018, DOI: 10.1016/j.mfglet.2018.01.003
- [103] C.-B. Zamfirescu, B.-C. Pirvu, D. Gorecky und H. Chakravarthy: „Human-centred Assembly: A Case Study for an Anthropocentric Cyber-physical System“, *Procedia Technology*, Jg. 15, S. 90–98, 2014, DOI: 10.1016/j.protcy.2014.09.038
- [104] K. Dencker, Å. Fasth, J. Stahre, L. Mårtensson, T. Lundholm und H. Akillioglu: „Proactive assembly systems-realising the potential of human collaboration with automation“, *Annual Reviews in Control*, Jg. 33, Nr. 2, S. 230–237, 2009, DOI: 10.1016/j.arcontrol.2009.05.004
- [105] K. Case, G. Backstrand, D. Högberg, P. Thorvald und L. De Vin: „An assembly line information system study“ in *ICMR08*, 2008
- [106] M. Gewohn, J. Beyerer, T. Usländer und G. Sutschet: „Smart Information Visualization for First-Time Quality within the Automobile Production Assembly Line“, *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 51, Nr. 11, S. 423–428, 2018, DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.333
- [107] M. Funk, S. Mayer und A. Schmidt: „Using In-Situ Projection to Support Cognitively Impaired Workers at the Workplace“ in *ASSETS '15*, Lisbon, Portugal, 2015, S. 185–192, DOI: 10.1145/2700648.2809853
- [108] M. Funk *et al.*: „Comparing projected in-situ feedback at the manual assembly workplace with impaired workers“ in *PETRA '15: 8th Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, Corfu Greece, 2015, S. 1–8, DOI: 10.1145/2769493.2769496
- [109] O. Korn, A. Schmidt und T. Hörz: „Assistive systems in production environments: exploring motion recognition and gamification“ in *PETRA '12*, Heraklion, Crete, Greece, 2012, S. 1, DOI: 10.1145/2413097.2413109

- [110] J. Haslwanter und B. Blazeovski: „Experiences with an Assistive System for Manual Assembly“ in *PETRA '18: 11th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, Corfu, Greece, 2018, S. 46–49, DOI: 10.1145/3197768.3203173
- [111] B. Blazeovski und J. Haslwanter: „User-centered development of a system to support assembly line worker“ in *MobileHCI '17: 19th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, Vienna Austria, 2017, S. 1–7, DOI: 10.1145/3098279.3119840
- [112] T. Kosch, Y. Abdelrahman, M. Funk und A. Schmidt: „One size does not fit all - Challenges of Providing Interactive Worker Assistance in Industrial Settings“ in *UbiComp '17*, Maui, Hawaii, 2017, S. 1006–1011, DOI: 10.1145/3123024.3124395
- [113] P. Johansson, G. Eriksson, L. Malmsköld, Å. Fast-Berglund und L. Moestam: „Assessment based information needs in manual assembly“, *dtetr, icpr*, 2018, DOI: 10.12783/dtetr/icpr2017/17637
- [114] L. Merkel, C. Berger, C. Schultz, S. Braunreuther und G. Reinhart: „Application-specific design of assistance systems for manual work in production“ in *IEEM 2017*, Singapore, 2017, DOI: 10.1109/IEEM.2017.8290080
- [115] P. Hold und W. Sihn: „Towards a model to identify the need and the economic efficiency of digital assistance systems in cyber-physical assembly systems“ in *CPPS 2016*, Vienna, Austria, 2016, DOI: 10.1109/ CPPS.2016.7483914
- [116] P. Hold, F. Ranz, W. Sihn und V. Hummel: „Planning Operator Support in Cyber-Physical Assembly Systems“, *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 49, Nr. 32, S. 60–65, 2016, DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.12.190
- [117] P. Hold, S. Erol, G. Reisinger und W. Sihn: „Planning and Evaluation of Digital Assistance Systems“, *Procedia Manufacturing*, Jg. 9, S. 143–150, 2017, DOI: 10.1016/j.promfg.2017.04.024
- [118] E. Gruhier, F. Demoly und S. Gomes: „A spatiotemporal information management framework for product design and assembly process planning reconciliation“, *Computers in Industry*, Jg. 90, S. 17–41, 2017, DOI: 10.1016/j.compind.2017.04.004
- [119] L.-M. Ou und X. Xu: „Relationship matrix based automatic assembly sequence generation from a CAD model“, *Computer-Aided Design*, Jg. 45, Nr. 7, S. 1053–1067, 2013, DOI: 10.1016/j.cad.2013.04.002
- [120] R. Iacob und D. Popescue: „Generation of Disassembly Directions Based on Component Mobility“, *SIC*, Jg. 22, Nr. 4, 2013, DOI: 10.24846/v22i4y201306
- [121] R. Müller, M. Vette, L. Hörauf und C. Speicher: „Consistent data Usage and Exchange Between Virtuality and Reality to Manage Complexities in Assembly Planning“, *Procedia CIRP*, Jg. 44, S. 73–78, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.126
- [122] R. Müller, L. Hörauf, M. Vette und C. Speicher: „Planning and Developing Cyber-physical Assembly Systems by Connecting Virtual and Real Worlds“, *Procedia CIRP*, Jg. 52, S. 35–40, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2016.07.050
- [123] L. Rentzos, S. Papanastasiou, N. Papakostas und G. Chryssolouris: „Augmented Reality for Human-based Assembly: Using Product and Process Semantics“, *IFAC Proceedings Volumes*, Jg. 46, Nr. 15, S. 98–101, 2013, DOI: 10.3182/20130811-5-US-2037.00053
- [124] J. Bönig, C. Fischer, M. Brandmeier, T. Mersdorf, T. Braun und C. Mrugalla: „Planning and Simulation of High-Voltage Energy Storage Assembly for Automotive Industry - from Scalable Product Concepts via Assembly Planning and Material Flow

- Simulation through to Web-Based Assembly Information“, *AMR*, Jg. 769, S. 42–49, 2013, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.769.42
- [125] C. Fischer, J. Bönig, J. Franke, M. Lušić und R. Hornfeck: „Worker information system to support during complex and exhausting assembly of high-voltage harness“ in *EDPC2015*, Nuremberg, Germany, 15.-16.09.2015, S. 1–7, DOI: 10.1109/EDPC.2015.7323211
- [126] T.-A. Pham und Y. Xiao: „Unsupervised Workflow Extraction from First-Person Video of Mechanical Assembly“ in *HotMobile '18: The 19th International Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, Tempe Arizona USA, 2018, S. 31–36, DOI: 10.1145/3177102.3177112
- [127] D. Gorecky, S. F. Worgan und G. Meixner: „COGNITO - A cognitive assistance and training system for manual tasks in industry“ in *the 29th Annual European Conference*, Rostock, Germany, 2011, S. 53, DOI: 10.1145/2074712.2074723
- [128] A. Claeys, S. Hoedt, H. van Landeghem und J. Cottyn: „Generic Model for Managing Context-Aware Assembly Instructions“, *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 49, Nr. 12, S. 1181–1186, 2016, DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.666
- [129] O. Korn, A. Schmidt und T. Hörz: „Augmented manufacturing“ in *the 6th International Conference*, Rhodes, Greece, 2013, S. 1–8, DOI: 10.1145/2504335.2504356
- [130] M. Funk, A. Bächler, L. Bächler, T. Kosch, T. Heidenreich und A. Schmidt: „Working with Augmented Reality?“ in *PETRA '17: 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, Island of Rhodes Greece, 2017, S. 222–229, DOI: 10.1145/3056540.3056548
- [131] A. Claeys, S. Hoedt, N. Soete, H. van Landeghem und J. Cottyn: „Framework for Evaluating Cognitive Support in Mixed Model Assembly Systems“, *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 48, Nr. 3, S. 924–929, 2015, DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.201
- [132] S. Erol und P. Hold: „Keeping Track of the Physical in Assembly Processes“ in *EDOCW*, Vienna, Austria, 2016, DOI: 10.1109/EDOCW.2016.7584365
- [133] M. Zäh und M. Wiesbeck: „A Model for Adaptively Generating Assembly Instructions Using State-based Graphs“ in *Manufacturing Systems*, Tokyo, Japan, 2008, S. 195–198, DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8_39
- [134] R. Müller, M. Vette-Steinkamp, L. Hörauf, C. Speicher und A. Bashir: „Information and data structure to create flexible work plans for worker assistance system at re-work site“, *Procedia CIRP*, Jg. 79, S. 147–152, 2019, DOI: 10.1016/j.procir.2019.02.033
- [135] A. Arndt und R. Anderl: „Employee data model for flexible and intelligent assistance systems in smart factories“ in *AHFE 2016*, Orlando, Florida, USA, 2016, DOI: 10.1007/978-3-319-41697-7_44
- [136] N. Galaske und R. Anderl: „Approach for the Development of an Adaptive Worker Assistance System Based on an Individualized Profile Data Model“ in *Advances in Intelligent Systems and Computing, Advances in Ergonomics of Manufacturing: Managing the Enterprise of the Future*, C. Schlick und S. Trzciliński, Hg., Cham: Springer, 2016, S. 543–556, DOI: 10.1007/978-3-319-41697-7_47
- [137] A. Claeys, S. Hoedt, M. Schamp, H. van Landeghem und J. Cottyn: „Ontological Model for Managing Context-aware Assembly Instructions“, *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 51, Nr. 11, S. 176–181, 2018, DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.254

- [138] M. Haslgrubler, B. Gollan und A. Ferscha: „A Cognitive Assistance Framework for Supporting Human Workers in Industrial Tasks“, *IT Prof.*, Jg. 20, Nr. 5, S. 48–56, 2018, DOI: 10.1109/MITP.2018.053891337
- [139] M. Aehnelt und S. Bader: „Information Assistance for Smart Assembly Stations“ in *International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, Lisbon, Portugal, 2015, S. 143–150, DOI: 10.5220/0005216501430150
- [140] K. Sebastian: „Event cognition at the workplace: perceiving, understanding, and practicing assembly tasks“. [Online]. Verfügbar unter: <https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/index/index/docId/4211>
- [141] Å. Fast-Berglund, M. Åkerman, M. Karlsson, V. G. Hernández und J. Stahre: „Cognitive Automation Strategies – Improving Use-efficiency of Carrier and Content of Information“, *Procedia CIRP*, Jg. 17, S. 67–70, 2014, DOI: 10.1016/j.procir.2014.02.042
- [142] M. Fujita, R. Kato, K. Watanabe, J. T. C. Tan und T. Arai: „Operators' mental strain induced by information support in cell production“ in *2009 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*, Seoul, South Korea, 2009, S. 196–201, DOI: 10.1109/ISAM.2009.5376904
- [143] T. Kosch, M. Funk, A. Schmidt und L. L. Chuang: „Identifying Cognitive Assistance with Mobile Electroencephalography“, *PACMHCI EICS*, Jg. 2, EICS, S. 1–20, 2018, DOI: 10.1145/3229093
- [144] S. Mattsson und Å. Fast-Berglund: „How to Support Intuition in Complex Assembly?“, *Procedia CIRP*, Jg. 50, S. 624–628, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.014
- [145] M. Lušić, K. Braz, S. Wittmann, C. Fischer, R. Hornfeck und J. Franke: „Worker Information Systems Including Dynamic Visualisation: A Perspective for Minimising the Conflict of Objectives between a Resource-Efficient Use of Inspection Equipment and the Cognitive Load of the Worker“, *AMR*, Jg. 1018, S. 23–30, 2014, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.23
- [146] N. J. Mitra, Y.-L. Yang, D.-M. Yan, W. Li und M. Agrawala: „Illustrating how mechanical assemblies work“, *ACM Trans. Graph.*, Jg. 29, Nr. 4, S. 1–12, 2010, DOI: 10.1145/1778765.1778795
- [147] F. Loch, F. Quint und I. Brisstel: „Comparing Video and Augmented Reality Assistance in Manual Assembly“ in *IE 2016*, London, UK, 2016, S. 147–150, DOI: 10.1109/IE.2016.31
- [148] S. Stork und A. Schubö: „Human cognition in manual assembly: Theories and applications“, *Advanced Engineering Informatics*, Jg. 24, Nr. 3, S. 320–328, 2010, DOI: 10.1016/j.aei.2010.05.010
- [149] P. Thorvald, D. Högberg und K. Case: „The effect of information mobility on production quality“, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Jg. 27, Nr. 2, S. 120–128, 2014, DOI: 10.1080/0951192X.2013.800236
- [150] P. Thorvald, A. Brolin, D. Högberg und K. Case: „Using Mobile Information Sources to Increase Productivity and Quality“ in *Advances in Human Factors and Ergonomics Series, Advances in Cognitive Ergonomics*, D. Kaber und G. Boy, Hg., London: CRC Press / Taylor & Francis Group, 2010, S. 450–459, DOI: 10.1201/EBK1439834916-c46
- [151] L. Rodriguez, F. Quint, D. Gorecky, D. Romero und H. R. Siller: „Developing a Mixed Reality Assistance System Based on Projection Mapping Technology for

- Manual Operations at Assembly Workstations“, *Procedia Computer Science*, Jg. 75, S. 327–333, 2015, DOI: 10.1016/j.procs.2015.12.254
- [152] C. Stößel, M. Wiesbeck, S. Stork, M. Zäh und A. Schubö: „Towards Optimal Worker Assistance: Investigating Cognitive Processes in Manual Assembly“ in *Manufacturing Systems*, Tokyo, Japan, 2008, DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8_50
- [153] S. Büttner, O. Sand und C. Röcker: „Extending the Design Space in Industrial Manufacturing Through Mobile Projection“ in *MobileHCI '15: 17th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, Copenhagen Denmark, 2015, S. 1130–1133, DOI: 10.1145/2786567.2794342
- [154] O. Sand, S. Büttner, V. Paelke und C. Röcker: „smARt.Assembly – Projection-Based Augmented Reality for Supporting Assembly Workers“ in *Lecture Notes in Computer Science, Virtual, Augmented and Mixed Reality*, S. Lackey und R. Shumaker, Hg., Cham: Springer, 2016, S. 643–652, DOI: 10.1007/978-3-319-39907-2_61
- [155] M. Mengoni, S. Ceccacci, A. Generosi und A. Leopardi: „Spatial Augmented Reality: an application for human work in smart manufacturing environment“, *Procedia Manufacturing*, Jg. 17, S. 476–483, 2018, DOI: 10.1016/j.promfg.2018.10.072
- [156] A. Syberfeldt, M. Holm, O. Danielsson, L. Wang und R. L. Brewster: „Support Systems on the Industrial Shop-floors of the Future – Operators’ Perspective on Augmented Reality“, *Procedia CIRP*, Jg. 44, S. 108–113, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.017
- [157] M. Wille, P. M. Scholl, S. Wischniewski und K. V. Laerhoven: „Comparing Google Glass with Tablet-PC as Guidance System for Assembling Tasks“ in *BSN-WORKSHOPS '14*, 2014, DOI: 10.1109/BSN.Workshops.2014.11
- [158] S. Büttner, M. Funk, O. Sand und C. Röcker: „Using Head-Mounted Displays and In-Situ Projection for Assistive Systems“ in *PETRA '16: 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, Corfu Island Greece, 2016, S. 1–8, DOI: 10.1145/2910674.2910679
- [159] Y. Wang, S. Zhang, S. Yang, W. He und X. Bai: „Mechanical assembly assistance using marker-less augmented reality system“, *Assembly Automation*, Jg. 38, Nr. 1, S. 77–87, 2018, DOI: 10.1108/AA-11-2016-152
- [160] X. Wang, S. K. Ong und A. Y. C. Nee: „Multi-modal augmented-reality assembly guidance based on bare-hand interface“, *Advanced Engineering Informatics*, Jg. 30, Nr. 3, S. 406–421, 2016, DOI: 10.1016/j.aei.2016.05.004
- [161] P. Renner und T. Pfeiffer: „Evaluation of Attention Guiding Techniques for Augmented Reality-based Assistance in Picking and Assembly Tasks“ in *IUI'17: 22nd International Conference on Intelligent User Interfaces*, Limassol Cyprus, 2017, S. 89–92, DOI: 10.1145/3030024.3040987
- [162] M. Funk, J. Heusler, E. Akcay, K. Weiland und A. Schmidt: „Haptic, Auditory, or Visual?“ in *PETRA '16: 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, Corfu Island Greece, 2016, S. 1–6, DOI: 10.1145/2910674.2910683
- [163] T. Kosch, R. Kettner, M. Funk und A. Schmidt: „Comparing Tactile, Auditory, and Visual Assembly Error-Feedback for Workers with Cognitive Impairments“ in *ASSETS '16: The 18th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, Reno Nevada USA, 2016, S. 53–60, DOI: 10.1145/2982142.2982157
- [164] M. Lušić, C. Fischer, J. Bönig, R. Hornfeck und J. Franke: „Worker Information Systems: State of the Art and Guideline for Selection under Consideration of Company

- Specific Boundary Conditions“, *Procedia CIRP*, Jg. 41, S. 1113–1118, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.003
- [165] V. Paelke und C. Röcker: „User Interfaces for Cyber-Physical Systems: Challenges and Possible Approaches“ in *Lecture Notes in Computer Science, Design, User Experience, and Usability: Design Discourse*, A. Marcus, Hg., Cham: Springer, 2015, S. 75–85, DOI: 10.1007/978-3-319-20886-2_8
- [166] V. Villani, L. Sabattini, G. Riggio, A. Levratti, C. Secchi und C. Fantuzzi: „Interacting With a Mobile Robot with a Natural Infrastructure-Less Interface“, *IFAC-PapersOn-Line*, Jg. 50, Nr. 1, S. 12753–12758, 2017, DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1829
- [167] F. Saxen, O. Rashid, A. Al-Hamadi, S. Adler, A. Kernchen und R. Mecke: „Image-Based Methods for Interaction with Head-Worn Worker-Assistance Systems“, *JILSA*, Jg. 06, Nr. 03, S. 141–152, 2014, DOI: 10.4236/jilsa.2014.63011
- [168] S. Büttner, O. Sand und C. Röcker: „Exploring Design Opportunities for Intelligent Worker Assistance: A New Approach Using Projection-Based AR and a Novel Hand-Tracking Algorithm“ in Bd. 10217, *Ambient Intelligence*, A. Braun, R. Wichert und A. Maña, Hg., Cham: Springer, 2017, S. 33–45, DOI: 10.1007/978-3-319-56997-0_3
- [169] Y. Obinata, G. Suzuki, T. Murase und Y. Fujii: „Pose Estimation for a Cuboid with Regular Patterns in an Interactive Assembly-support Projection System“ in *ISS '16: 2016 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, Niagara Falls Ontario Canada, 2016, S. 331–336, DOI: 10.1145/2992154.2996776
- [170] G. Gao, K. Qian, X. Ma, J. Xia und H. Yu: „Object Recognition and Augmentation for Wearable-Assistive System Using Egocentric RGB-D Sensor“ in *2017 IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, Honolulu, HI, 2017, S. 775–780, DOI: 10.1109/CYBER.2017.8446467
- [171] A. Rukubayihunga, J.-Y. Didier und S. Otmane: „Towards assembly steps recognition in augmented reality“ in *VRIC '16: Virtual Reality International Conference - Laval Virtual 2016*, Laval France, 2016, S. 1–5, DOI: 10.1145/2927929.2927953
- [172] S. Kaczmarek, S. Hogleve und K. Tracht: „Progress Monitoring and Gesture Control in Manual Assembly Systems Using 3D-image Sensors“, *Procedia CIRP*, Jg. 37, S. 1–6, 2015, DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.006
- [173] C. Fischer, M. Lušić, F. Faltus, R. Hornfeck und J. Franke: „Enabling Live Data Controlled Manual Assembly Processes by Worker Information System and Nearfield Localization System“, *Procedia CIRP*, Jg. 55, S. 242–247, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2016.08.013
- [174] J. Zhang, S. K. Ong und A. Y. C. Nee: „RFID-assisted assembly guidance system in an augmented reality environment“, *International Journal of Production Research*, Jg. 49, Nr. 13, S. 3919–3938, 2011, DOI: 10.1080/00207543.2010.492802
- [175] M. D. Mura, G. Dini und F. Failli: „An Integrated Environment Based on Augmented Reality and Sensing Device for Manual Assembly Workstations“, *Procedia CIRP*, Jg. 41, S. 340–345, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.128
- [176] T. Ruppert und J. Abonyi: „Software Sensor for Activity-Time Monitoring and Fault Detection in Production Lines“, *Sensors (Basel, Switzerland)*, Jg. 18, Nr. 7, 2018, DOI: 10.3390/s18072346
- [177] F. Duan, J. T. C. Tan, R. Kato und T. Arai: „Operator Monitoring System for Cell Production“, *Advanced Robotics*, Jg. 23, Nr. 10, S. 1373–1391, 2009, DOI: 10.1163/156855309X462637

- [178] C. Di Valentin, A. Emrich, D. Werth und P. Loos: „User-Centric Workflow Ergonomics in Industrial Environments: Concept and Architecture of an Assistance System“ in *2015 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, Las Vegas, NV, 2015, S. 754–759, DOI: 10.1109/CSCI.2015.116
- [179] J. T. Kersten und N. B. Fethke: „Radio frequency identification to measure the duration of machine-paced assembly tasks: Agreement with self-reported task duration and application in variance components analyses of upper arm postures and movements recorded over multiple days“, *Applied Ergonomics*, Jg. 75, S. 74–82, 2019, DOI: 10.1016/j.apergo.2018.09.005
- [180] K. Bauters, J. Cottyn, D. Claeys, M. Slembrouck, P. Veelaert und H. van Landeghem: „Automated work cycle classification and performance measurement for manual work stations“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Jg. 51, S. 139–157, 2018, DOI: 10.1016/j.rcim.2017.12.001
- [181] H. Xiao, Y. Duan, Z. Zhang und M. Li: „Detection and estimation of mental fatigue in manual assembly process of complex products“, *Assembly Automation*, Jg. 38, Nr. 2, S. 239–247, 2018, DOI: 10.1108/AA-03-2017-040
- [182] J. Provost, A. H. Ebrahimi und K. Åkesson: „Online Support for Shop-Floor Operators Using Body Movements Tracking“, *IFAC Proceedings Volumes*, Jg. 46, Nr. 15, S. 102–109, 2013, DOI: 10.3182/20130811-5-US-2037.00077
- [183] A. W. Colombo und F. Jammes: „Integration of Cross-layer Web-based Service-oriented Architecture and Collaborative Automation Technologies: The SOCRADES Approach“, *IFAC Proceedings Volumes*, Jg. 42, Nr. 4, S. 2101–2106, 2009, DOI: 10.3182/20090603-3-RU-2001.0450
- [184] F. Quint, F. Loch, M. Orfgen und D. Zühlke: „A System Architecture for Assistance in Manual Tasks“ in *IE 2016*, London, UK, 2016, DOI: 10.3233/978-1-61499-690-3-43
- [185] R. Müller, M. Vette, L. Hörauf, C. Speicher und D. Burkhard: „Lean Information and Communication Tool to Connect Shop and Top Floor in Small and Medium-sized Enterprises“, *Procedia Manufacturing*, Jg. 11, S. 1043–1052, 2017, DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.215
- [186] C. Fischer, M. Lušić, F. Faltus, R. Hornfeck und J. Franke: „Integrating Workers’ Feedback into Continuous Information Flows: Enabling Lean Quality Assurance by Worker Information Systems“, *AMR*, Jg. 1140, S. 435–442, 2016, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1140.435
- [187] T. Steinhäusser, G. Reinhart und C. Intra: „Quantifying the Degree of Assembly-readiness of High-variant Low-volume Products During the New Product Development Process“, *Procedia CIRP*, Jg. 57, S. 85–91, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.016
- [188] R. Anderl: „Virtuelle Produktentstehung“ in *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*, K.-H. Grote und J. Feldhusen, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2014, S. 1909–1923, DOI: 10.1007/978-3-642-38891-0_156
- [189] Angular, Google LLC, 1600 Amphitheatre Parkway Mountain View, CA 94043, USA. [Online]. Verfügbar unter: <https://angular.io/>
- [190] Node.JS, The OpenJS Foundation, 548 Market St. PMB 57274, San Francisco, CA 94104. [Online]. Verfügbar unter: <https://nodejs.org/> (Zugriff am: 9. April 2023)
- [191] Socket.io. [Online]. Verfügbar unter: <https://socket.io/> (Zugriff am: 9. April 2023)

-
- [192]** ASF: The Apache HTTP Server Project, The Apache Software Foundation, 1000 N West Street, Suite 1200. [Online]. Verfügbar unter: <https://httpd.apache.org/> (Zugriff am: 9. April 2023)
- [193]** ExpressJS, The OpenJS Foundation, 548 Market St. PMB 57274, San Francisco, CA 94104. [Online]. Verfügbar unter: <https://expressjs.com/> (Zugriff am: 9. April 2023)
- [194]** Oracle: MySQL, Oracle Corporation, 500 Oracle Parkway, M/S 5op7, Redwood Shores, CA 94065. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mysql.com/> (Zugriff am: 9. April 2023)
- [195]** Eclipse: Mosquitto, Eclipse Foundation AISBL, Rond Point Schuman 11, Brussels 1040 Belgium. [Online]. Verfügbar unter: <https://mosquitto.org/>
- [196]** Threedy: Instant3DHub, Threedy GmbH, Fraunhoferstraße 5, 64283 Darmstadt. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.threedy.io/> (Zugriff am: 9. April 2023)
- [197]** Fraunhofer IGD: instant3dhub, Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung IGD. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2017/februar/komplexe-3d-daten-auf-allen-geraeten.html> (Zugriff am: 9. April 2023)

Anhang

A. Mitarbeiterbefragung Prototypenmontage

1. Allgemeine Fragen

Zunächst einige allgemeine, freiwillige Fragen zu Ihrer Funktion und Ihrer Erfahrung.

1.1 Was ist Ihre Funktion / Rolle?

- Projektsprecher (PS)
- Montagelinienkoordinator (MLK)
- Zonenverantwortlicher (ZV)
- Anlauftrainer (ALT)
- Andere: _____
- Keine Angabe*

1.2 Wie lange sind Sie schon in dieser Rolle tätig?

- weniger als 6 Monate
- 6 Monate – 1 Jahr
- 1-2 Jahre
- 3-5 Jahre
- mehr als 5 Jahre
- Keine Angabe*

1.3 Wie viele Fahrzeugprojekte haben Sie in dieser Zeit begleitet?

- 1-2
- 3-5
- 5 oder mehr
- Keine Angabe*

3.5 Informationen zu **Produkt**änderungen erhalte ich zeitnah über einen definierten Prozess / Ansprechpartner in ausreichendem Umfang.

| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| <input type="radio"/> |

3.6 Wie erfahren Sie von **Produkt**änderungen?

3.7 Informationen zu **Prozess**änderungen erhalte ich zeitnah über einen definierten Prozess / Ansprechpartner in ausreichendem Umfang.

| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| <input type="radio"/> |

3.8. Wie erfahren Sie von **Prozess**änderungen?

4. Problemmanagement – Erfassung und Meldung

4.1 Für die Problemmeldung und -bearbeitung existieren klar definierte Regelprozesse.

| | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| <input type="radio"/> |

4.2 Meldewege und Eskalationsmöglichkeiten sind definiert und allen Beteiligten bekannt.

| | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| <input type="radio"/> |

4.3 Es existiert ein eindeutiges Rollenkonzept mit Vertreterregelung.

| | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| <input type="radio"/> |

4.4 Die Regelprozesse werden von allen Beteiligten stets eingehalten und aktiv „gelebt“.

| | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| <input type="radio"/> |

4.5 Die Dokumentation und -Meldung von Produkt- und Prozessproblemen erfolgt ...

- ... durch denjenigen, der das Problem feststellt.
- ... durch eine zentrale Stelle in der Zone / Linie.
- ... durch eine zentrale Stelle im Projekt.
- ... durch eine zentrale Stelle in der Prototypenmontage.
- Andere: _____

4.6 Der Aufwand zur Dokumentation und -Meldung von Produkt- und Prozessproblemen ist ...

- ... gering.
- ... akzeptabel.
- ... hoch.
- ... sehr hoch.

4.7 Bei Produkt- und Prozessproblemen wird stets eine umfangreiche Dokumentation angestrebt und eine Ursachen(vor)analyse durchgeführt, um dem Lösungsverantwortlichen möglichst alle nötigen Informationen zur Verfügung zu stellen.

| | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| <input type="radio"/> |

4.8 Auch geringfügige Probleme werden systematisch dokumentiert.

| | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| <input type="radio"/> |

4.9 Es ist in der Praxis stets klar, ob ein Problem erfasst werden muss.

| | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| <input type="radio"/> |

4.10 Wie oft erfassen Sie Probleme mündlich im Dialog / einer Gruppe?

| | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Häufig | Teilweise | Kaum | Nie |
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

4.11 Wie oft erfassen Sie Probleme in Papierform?

| | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Häufig | Teilweise | Kaum | Nie |
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

4.12 Wie oft erfassen Sie Probleme in einer Büroanwendung (z.B. Microsoft Excel oder Powerpoint)?

| | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Häufig | Teilweise | Kaum | Nie |
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

4.13 Wie oft erfassen Sie Probleme in einem IT-System?

| | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Häufig | Teilweise | Kaum | Nie |
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

4.14 Werden dabei alle relevanten Informationen erfasst?

5. Problemmanagement – Lösung und Nachhaltigkeit

Im Problemlösungsprozess ...

5.1 ... sind häufige Rückfragen erforderlich.

| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| <input type="radio"/> |

5.2 ... ist ein persönliches Gespräch unabdingbar.

| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| <input type="radio"/> |

5.3 ... sind die richtigen Ansprechpartner oft schwer zu identifizieren.

| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| <input type="radio"/> |

5.4 ... werden Informationen zu bekannten Problemen systematisch genutzt.

| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| <input type="radio"/> |

5.5 ... hängt eine schnelle Bearbeitung von persönlichen Kontakten ab.

| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| <input type="radio"/> |

5.6 ... ist die Verortung der Fehlerquelle meist eindeutig möglich.

| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| <input type="radio"/> |

5.7 ... werden getroffene Verbesserungsmaßnahmen konsequent umgesetzt.

| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| <input type="radio"/> |

5.8 ... wird die Wirksamkeit der Verbesserungsmaßnahme gemessen und nachverfolgt.

| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| <input type="radio"/> |

5.9 Wie lange dauert es im Schnitt, bis ein entdecktes Problem gelöst wird?

- < 1 Woche
- < 1 Monat
- Mehrere Monate
- Noch in der Prototypenphase
- Bis SoP
- Nicht bekannt

5.10 Der Bearbeitungsstatus meiner gemeldeten Probleme ist mir bekannt.

| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| <input type="radio"/> |

5.11 Für gemeldete Probleme erhalte ich in angemessener Zeit Lösungsvorschläge, die ich hinsichtlich ihrer Wirksamkeit testen und bestätigen kann.

| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| <input type="radio"/> |

5.12 Es werden stets die Ursachen, nicht nur die Symptome gelöst.

| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| <input type="radio"/> |

5.13 Probleme, die gelöst wurden treten nicht wieder auf (nachhaltige Lösung).

| | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| <input type="radio"/> |

5.14 Informationen über gelöste Probleme aus der Vergangenheit / anderen Projekten sind verfügbar und werden systematisch für die Problemlösung genutzt (nachhaltiges Wissensmanagement).

| | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| <input type="radio"/> |

5.15 In welcher Form sind Informationen zu bekannten Problemen verfügbar?

- Papierform
- Büroanwendung (Excel, Powerpoint, etc.)
- IT-System
- PDF / Scan
- Gar nicht
- Unbekannt

5.16 Um zu überprüfen, ob ein Problem schon einmal aufgetreten ist...

- ... wende ich mich an meinen Kollegen
- ... wende ich mich an meinen Vorgesetzten
- ... suche ich es im Intranet
- ... sehe ich auf die Prozesstafel nach
- ... sehe ich in einer Problemdatenbank nach
- Weiteres: _____

5.17 Bei der Entwicklung von neuen Produkten werden Informationen zu Problemen aus vergangenen Projekten ...

- ... ausreichend berücksichtigt.
- ... nicht ausreichend genutzt, _____

5.18 Werden Fehler, die beim Anlauf im Serienwerk auftreten systematisch an das Prototypenwerk zurückgemeldet?

- Ja
- Teilweise
- Nein

5.19 Wie zufrieden sind Sie mit den momentanen Problemmeldeprozessen?

| | | | | | |
|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 Sehr zufrieden | 2 Zufrieden | 3 Befriedi- gend | 4 Ausrei- chend | 5 Mangelhaft | 6 Ungenü- gend |
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

5.20 Falls Sie Verbesserungspotential sehen, aus welchen Gründen sind Sie unzufrieden mit dem aktuellen Problemmanagement?

- Aufwand ist zu hoch
- Meldung und Dokumentation über die verfügbaren Wege sind zu Umständlich
- Prozess wird unzureichend von IT-Systemen unterstützt bzw. Benutzbarkeit der IT-Systeme ist unzureichend
- Abfrage unwichtiger Informationen
- Probleme werden nicht zeitnah gelöst (Bearbeitungszeit zu lang)
- Keine Anreize für Problemmeldung
- mangelnde Transparenz
- Weitere Gründe: _____

6. Problemarten und -schwerpunkte

Die Meldung von Problemen kann schneller und zielgerichteter erfolgen, wenn das Problem einer Kategorie zugeordnet werden kann. Daher folgen Fragen zur Kategorisierung von Problemen. Nennen Sie für folgende Kategorien Probleme, mit denen Sie besonders häufig konfrontiert sind.

6.1 Lackierte Karosse:

6.2 Teileversorgung:

6.3 Montage:

6.4 Weitere häufig auftretende Probleme in Ihrem Bereich:

6.5 Probleme, die besonders viel Zeit Kosten / den Prototypenaufbau stark verzögern:

6.6 Probleme, die einen besonders hohen Änderungsaufwand erzeugen:

7. Prozessabsicherung in der Prototypenmontage

Auf Grund des Prototypenstands und der Rahmenbedingungen können im Prototypenbau möglicherweise nicht alle Prozessaspekte adäquat für die Serie abgesichert werden. Welche Prozesse / Aspekte dies betrifft, soll mit den folgenden Fragen erfasst werden.

7.1 Montierbarkeit

| | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--|
| Kann vollständig abgesichert werden | Kann größtenteils abgesichert werden | Kann teilweise abgesichert werden | Kann nur unzureichend abgesichert werden |
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

7.2 Montagereihenfolge

| | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--|
| Kann vollständig abgesichert werden | Kann größtenteils abgesichert werden | Kann teilweise abgesichert werden | Kann nur unzureichend abgesichert werden |
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

7.3 Verbindungsreihenfolge

| | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--|
| Kann vollständig abgesichert werden | Kann größtenteils abgesichert werden | Kann teilweise abgesichert werden | Kann nur unzureichend abgesichert werden |
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

7.4 Fehlhandlungssicherheit (Poka Yoke)

| | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--|
| Kann vollständig abgesichert werden | Kann größtenteils abgesichert werden | Kann teilweise abgesichert werden | Kann nur unzureichend abgesichert werden |
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

7.5 Produktvarianz

| | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--|
| Kann vollständig abgesichert werden | Kann größtenteils abgesichert werden | Kann teilweise abgesichert werden | Kann nur unzureichend abgesichert werden |
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

7.6 Eignung der Betriebsmittel

| | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--|
| Kann vollständig abgesichert werden | Kann größtenteils abgesichert werden | Kann teilweise abgesichert werden | Kann nur unzureichend abgesichert werden |
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

7.7 Wiederholgenauigkeit / Prozessstabilität

| Kann vollständig abgesichert werden | Kann größtenteils abgesichert werden | Kann teilweise abgesichert werden | Kann nur unzureichend abgesichert werden |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

7.8 Ergonomie

| Kann vollständig abgesichert werden | Kann größtenteils abgesichert werden | Kann teilweise abgesichert werden | Kann nur unzureichend abgesichert werden |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

7.9 Aus welchen Gründen können Prozesse in der Prototypenmontage nicht ausreichend abgesichert werden?

8. Abschlussgedanken

Wie können Problemmanagement und Prozessabsicherung im Prototypenbau optimiert werden?

8.1 Um meine Aufgabe besser erfüllen zu können, bräuchte ich

8.2 Mir fehlen folgende Informationen in der Montage

8.3 Mir fehlen folgende Mittel in der Montage

8.4 Ich wünsche mir mehr Unterstützung durch

- Prozessplanung
- Produktentwicklung
- Andere Bereiche / Kompetenzen:

8.5 Was möchten Sie uns noch mitteilen? (Anregungen, Wünsche, Kommentare, Kritik)

Ergebnisse Mitarbeiterbefragung

| Frage | Antworten | | | | | |
|-------|----------------|-----------|----------------|----------------------|-----------------|---------------------------|
| | 1.1 | PS | MLK | ZV | ALT | Andere |
| | 4 | 5 | 10 | 11 | 2 | 0 |
| 1.2 | < 6 Monate | < 1 Jahr | 1-2 Jahre | 3-5 Jahre | > 5 Jahre | Keine Angabe |
| | 0 | 0 | 15 | 7 | 10 | 0 |
| 1.3 | 1-2 | 3-5 | > 5 | Keine Angabe | | |
| | 4 | 8 | 21 | 0 | | |
| 2.1 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 1 | 2 | 7 | 13 | 7 | 2 |

| | | | | | | |
|-----|----------------|----------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------------|
| 2.2 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 7 | 11 | 6 | 4 | 3 | 1 |
| 2.3 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 1 | 2 | 10 | 11 | 5 | 3 |
| 2.4 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 2 | 5 | 13 | 9 | 3 | 0 |
| 3.1 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 1 | 6 | 15 | 2 | 6 | 2 |
| 3.2 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 0 | 3 | 5 | 11 | 9 | 4 |
| 3.3 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 1 | 2 | 9 | 7 | 10 | 3 |
| 3.4 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 0 | 3 | 5 | 8 | 14 | 3 |
| 3.5 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 0 | 5 | 6 | 10 | 8 | 3 |
| 3.6 | Vorgesetzter | Tägliche Besprechung | Produkt-integrator | Per Email | Auf Nachfrage | |
| | 4 | 11 | 8 | 3 | 3 | |
| 3.7 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 0 | 4 | 4 | 9 | 11 | 4 |
| 3.8 | Vorgesetzter | Montage-planer | Produkt-integrator | Aus Montage-planungs-system | Auf Nachfrage | |
| | 3 | 5 | 2 | 1 | 3 | |
| 4.1 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 3 | 5 | 8 | 9 | 3 | 4 |
| 4.2 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 3 | 5 | 10 | 8 | 3 | 3 |

| | | | | | | |
|------|------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------|---------------------------|
| 4.3 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 3 | 7 | 13 | 6 | 2 | 1 |
| 4.4 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 1 | 2 | 11 | 13 | 2 | 3 |
| 4.5 | Den Feststeller | zentrale Stelle je Bereich | zentrale Stelle je Projekt | zentrale Stelle Prototypenbau | Andere | |
| | 8 | 12 | 4 | 3 | 5 | |
| 4.6 | sehr hoch | hoch | akzeptabel | gering | | |
| | 7 | 9 | 16 | 0 | | |
| 4.7 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 3 | 7 | 11 | 7 | 2 | 2 |
| 4.8 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 2 | 0 | 9 | 13 | 5 | 3 |
| 4.9 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 2 | 4 | 10 | 8 | 6 | 2 |
| 4.10 | Häufig | Teilweise | Kaum | Nie | | |
| | 15 | 9 | 8 | 0 | | |
| 4.11 | Häufig | Teilweise | Kaum | Nie | | |
| | 13 | 15 | 3 | 1 | | |
| 4.12 | Häufig | Teilweise | Kaum | Nie | | |
| | 7 | 17 | 6 | 2 | | |
| 4.13 | Häufig | Teilweise | Kaum | Nie | | |
| | 4 | 8 | 15 | 5 | | |
| 4.14 | Ja | Nein | | | | |
| | 12 | 20 | | | | |
| 4.15 | Textuelle Beschreibung | Problemort / Lage | Betroffene Funktion | Prozessschritt | Fahrzeug-daten | Rahmenbedingungen |
| | 30 | 29 | 10 | 7 | 28 | 4 |
| | Potenzielle Ursache | Mögliche Lösungen | | | | |
| 4.16 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 1 | 5 | 7 | 9 | 6 | 4 |
| 5.1 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 8 | 11 | 10 | 3 | 0 | 0 |

| | | | | | | |
|------|----------------|-----------|----------------|----------------------|-----------------|---------------------------|
| 5.2 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 10 | 12 | 5 | 2 | 3 | 0 |
| 5.3 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 5 | 9 | 11 | 5 | 2 | 0 |
| 5.4 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 0 | 1 | 9 | 13 | 6 | 3 |
| 5.5 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 13 | 10 | 6 | 2 | 1 | 0 |
| 5.6 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 0 | 6 | 5 | 13 | 6 | 2 |
| 5.7 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 2 | 6 | 8 | 10 | 4 | 2 |
| 5.8 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 3 | 5 | 7 | 10 | 5 | 2 |
| 5.9 | < 1 Woche | < 1 Monat | Mehrere Monate | Prototypenphase | bis SoP | Unbekannt |
| | 1 | 2 | 7 | 6 | 4 | 12 |
| 5.10 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 1 | 3 | 4 | 13 | 9 | 2 |
| 5.11 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 0 | 5 | 9 | 12 | 4 | 2 |
| 5.12 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 0 | 4 | 13 | 12 | 3 | 0 |
| 5.13 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 0 | 5 | 8 | 12 | 5 | 2 |
| 5.14 | Stimme voll zu | Stimme zu | Stimme eher zu | Stimme eher nicht zu | Stimme nicht zu | Stimme überhaupt nicht zu |
| | 0 | 3 | 9 | 9 | 8 | 3 |

| | | | | | | |
|------|-------------------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------|------------------|
| 5.15 | Papierform | Büro-anwendung | IT-System | PDF / Scan | Gar nicht | Unbekannt |
| | 4 | 9 | 7 | 4 | 2 | 12 |
| 5.16 | Kollegen | Vorgesetzte | Intranet | Prozesstafel | Problem-datenbank | Andere |
| | 9 | 12 | 0 | 4 | 7 | 1 |
| 5.17 | ausreichend berücksichtigt | | | nicht ausreichend genutzt | | |
| | 15 | | | 17 | | |
| 5.18 | Ja | Teilweise | Nein | | | |
| | 4 | 19 | 9 | | | |
| 5.19 | sehr zufrieden | zufrieden | befriedigend | aureichend | mangelhaft | ungenügend |
| | 1 | 8 | 14 | 3 | 4 | 2 |
| 5.20 | Aufwand zu hoch | Meldewege Umständlich | ungenügende IT | irrelevante Information | lange Bearbeitungszeit | fehlende Anreize |
| | 8 | 7 | 5 | 1 | 12 | 5 |
| | Mangelhafte Transparenz | Andere | | | | |
| 6.1 | fehlende / defekte / falsche Bolzen | fehlerhafter PVC-Auftrag | Transport-schäden | Maßhaltigkeit | | |
| | 14 | 8 | 5 | 9 | | |
| 6.2 | Fehlende Teile | falsche Version | defekte Teile | Transport-schäden | | |
| | 24 | 14 | 9 | 8 | | |
| 6.3 | Fehlende Prozess-daten | Falsche Montageorte | Falsche Montagereihenfolge | | | |
| | 12 | 18 | 7 | | | |
| 6.4 | Fehlerhafte Stücklisten | Fehlende Informationen | Fehlende Komponenten | | | |
| | 15 | 17 | 9 | | | |
| 6.5 | Fehlende Information | Fehlende Bauteile | Fehlerhafte Karossen | | | |
| | 18 | 22 | 8 | | | |
| 6.6 | Nacharbeit Fehlteile | Korrektur Montageorte | | | | |
| | 19 | 9 | | | | |
| 7.1 | vollständig absicherbar | größtenteils absicherbar | teilweise absicherbar | unzureichend absicherbar | | |
| | 4 | 16 | 10 | 2 | | |
| 7.2 | vollständig absicherbar | größtenteils absicherbar | teilweise absicherbar | unzureichend absicherbar | | |
| | 3 | 17 | 9 | 3 | | |
| 7.3 | vollständig absicherbar | größtenteils absicherbar | teilweise absicherbar | unzureichend absicherbar | | |
| | 7 | 12 | 10 | 3 | | |

| | | | | | | |
|-----|---|-------------------------------|---|---|-----------------------------|--------------------------|
| 7.4 | vollständig absicherbar | größtenteils absicherbar | teilweise absicherbar | unzureichend absicherbar | | |
| | 3 | 10 | 17 | 2 | | |
| 7.5 | vollständig absicherbar | größtenteils absicherbar | teilweise absicherbar | unzureichend absicherbar | | |
| | 1 | 9 | 12 | 10 | | |
| 7.6 | vollständig absicherbar | größtenteils absicherbar | teilweise absicherbar | unzureichend absicherbar | | |
| | 2 | 7 | 17 | 6 | | |
| 7.7 | vollständig absicherbar | größtenteils absicherbar | teilweise absicherbar | unzureichend absicherbar | | |
| | 1 | 4 | 6 | 21 | | |
| 7.8 | vollständig absicherbar | größtenteils absicherbar | teilweise absicherbar | unzureichend absicherbar | | |
| | 2 | 7 | 19 | 4 | | |
| 7.9 | Fehlende Information | Bauteilqualität, Produktreife | Prozessreife / Vollständigkeit der Arbeitsanweisungen | Serienumfeld (Fördertechnik, Betriebsmittel, Bereitstellung, Zeitdruck) | | Kein Derivatemix |
| | 29 | 25 | 21 | 14 | | 5 |
| 8.1 | Mehr Informationen | Bessere Teilequalität | Höhere Produktreife | Mehr Zeit | Bessere Software & Schulung | Schnellere Problemlösung |
| | 23 | 19 | 13 | 9 | 6 | 5 |
| 8.2 | Logistik / Teileverfügbarkeit | Verbindungsparameter | Informationen zu Produktkonzept und Komponenten | Informationen zu Montageabläufen | Status einer Problemmeldung | |
| | 19 | 17 | 13 | 10 | 9 | |
| 8.3 | Serienwerkzeuge | | | | | |
| | 12 | | | | | |
| 8.4 | Prozessplanung | Produktentwicklung | Andere | | | |
| | 17 | 13 | 2 | | | |
| 8.5 | Feedback Erprobungsergebnisse | | | | | |
| | Bessere Kommunikation mit Planern und Integratoren | | | | | |
| | Bessere Vorleistung Planung und virtuelle Absicherung | | | | | |
| | Vor Ort Tests an Serienlinie | | | | | |

B. Ergebnisse der Literaturrecherche

| # | Titel | Autor | in |
|----|---|--|---|
| 1 | Radio frequency identification to measure the duration of machine-paced assembly tasks | J. Kersten, N. Fethke | Applied Ergonomics, Volume 75, 2019 DOI 10.1016/j.apergo.2018.09.005 |
| 2 | Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach | G. Michalos, S. Makris, N. Papakostas | CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Volume 2/2, 2010 DOI 10.1016/j.cirpj.2009.12.001 |
| 3 | Augmented Reality for Human-based Assembly: Using Product and Process Semantics | L. Rentzos, S. Papanastasiou, N. Papakostas, G. Chryssolouris | IFAC Proceedings Volumes, Volume 46, 2013 DOI 10.3182/20130811-5-US-2037.00053 |
| 4 | A task-driven intelligent workspace system to provide guidance feedback | M. Ryoo, K. Grauman, J. Aggarwal | Computer Vision and Image Understanding, Volume 114, 2010 DOI 10.1016/j.cviu.2009.12.009 |
| 5 | Integration of Product Design and Assembly Planning in the Digital Factory | H. Bley, C. Franke | CIRP Annals, Volume 1/53, 2004 DOI 10.1016/S0007-8506(07)60637-4 |
| 6 | Integrated assembly line loading, design, and labor planning | R. Inman, W. Jordan | Journal of Manufacturing Systems, Volume 5/16, 1997 DOI 10.1016/S0278-6125(97)88462-2 |
| 7 | Data collection and analysis of manual work using video recording and personal computer techniques | T. Engström, P. Medbo | International Journal of Industrial Ergonomics, Volume 19, Issue 4, 1997 DOI 10.1016/S0169-8141(96)00038-8 |
| 8 | Integration of Cross-layer Web-based Service-oriented Architecture and Collaborative Automation Technologies | A. Colombo, F. Jammes | IFAC Proceedings Volumes, Volume 42, Issue 4, 2009 DOI10.3182/20090603-3-RU-2001.0450 |
| 9 | Future trends in management and operation of assembly systems: from customized assembly systems to cyber-physical systems | O. Battaïa, A. Otto, F. Sgarbossa, E. Pesch | Omega, Volume 78, Elsevier B.V., 2018 DOI 10.1016/j.omega.2018.01.010 |
| 10 | A complementary Cyber-Human Systems framework for Industry 4.0 Cyber-Physical Systems | M. Krugh, L. Mears | Manufacturing Letters, Volume 15B, 2018 DOI 10.1016/j.mfglet.2018.01.003 |
| 11 | Planning and Developing Cyber-physical Assembly Systems by Connecting Virtual and Real Worlds | R. Müller, L. Hörauf, M. Vette, C. Speicher | Procedia CIRP, Volume 52, 2016 DOI 10.1016/j.procir.2016.07.050 |
| 12 | Human-centred Assembly: A Case Study for an Anthropocentric Cyber-physical System | C.-B. Zamfirescu, B.-C. Pirvu, D. Gorecky, H. Chakravarthy | Procedia Technology, Volume 15, 2014 DOI 10.1016/j.protcy.2014.09.038 |
| 13 | User Centered Design of a Cyber-physical Support Solution for Assembly Processes | T. Römer, R. Bruder | Procedia Manufacturing, Volume 3, 2015 DOI 10.1016/j.promfg.2015.07.208 |

| | | | |
|----|--|--|---|
| 14 | Digital Real-time Feedback of Quality-related Information to Inspection and Installation Areas of Vehicle Assembly | M. Gewohn, T. Usländer, J. Beyerer, G. Sutschet | Procedia CIRP, Volume 67, 2018 DOI 10.1016/j.procir.2017.12.242 |
| 15 | A Collaborative Manufacturing Approach supporting adoption of IoT Principles in Micro Devices Assembly | J. Cecil | Procedia Manufacturing, Volume 26, 2018 DOI 10.1016/j.promfg.2018.07.141 |
| 16 | Vulnerability evaluation method applied to manufacturing systems | G. Gao, W. Yue, W. Ou, H. Tang | Reliability Engineering & System Safety, Volume 180, 2018 DOI 10.1016/j.ress.2018.06.011 |
| 17 | Operation-based Configuration Complexity Measurement for Manufacturing System | F. Guolianga et al. | Procedia CIRP, Volume 63, 2017 DOI 10.1016/j.procir.2017.03.136 |
| 18 | Knowledge extraction and visualization of digital design process | J. Yanga et al. | Expert Systems with Applications, Volume 92, 2018 DOI 10.1016/j.eswa.2017.09.002 |
| 19 | Lean Information and Communication Tool to Connect Shop and Top Floor in Small and Medium-sized Enterprises | R. Müller, M. Vette, L. Hörauf, C. Speicher, D. Burkhard | Procedia Manufacturing, Volume 11, 2017 DOI 10.1016/j.promfg.2017.07.215 |
| 20 | Using In-Situ Projection to Support Cognitively Impaired Workers at the Workplace | M. Funk, S. Mayer, A. Schmidt | Proceedings of the 17th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility, 2015 DOI 10.1145/2700648.2809853 |
| 21 | User-centered development of a system to support assembly line worker | B. Blazeovski, J. Hallowell Haslwanter | Proceedings of the 19th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI, 2017 DOI 10.1145/3098279.3119840 |
| 22 | Identifying Cognitive Assistance with Mobile Electroencephalography: A Case Study with In-Situ Projections for Manual Assembly | T. Kosch, M. Funk, A. Schmidt, L. Chuang | Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction: Volume 2, 2018 DOI 10.1145/3229093 |
| 23 | Shortening Innovation Cycles by Employee Training Based on the Integration of Virtual Validation into Worker Information Systems | C. Fischer, M. Lušić, J. Böning, R. Hornfeck, J. Franke | Procedia CIRP, Volume 37, 2015 DOI 10.1016/j.procir.2015.08.090 |
| 24 | Worker Information Systems: State of the Art and Guideline for Selection under Consideration of Company Specific Boundary Conditions | C. Fischer, M. Lušić, J. Böning, R. Hornfeck, J. Franke | Procedia CIRP, Volume 41, 2016 DOI 10.1016/j.procir.2015.12.003 |
| 25 | Enabling Live Data Controlled Manual Assembly Processes by Worker Information System and Nearfield Localization System | C. Fischer, M. Lušić, F. Faltus, R. Hornfeck, J. Franke | Procedia CIRP, Volume 55, 2016 DOI 10.1016/j.procir.2016.08.013 |
| 26 | Image-Based Methods for Interaction with Head-Worn Worker-Assistance Systems | F. Saxen, O. Rashid, A. Al-Hamadi, et al. | Journal of Intelligent Learning Systems and Applications, 2014 DOI: 10.4236/jilsa.2014.63011 |
| 27 | Ein Assistenzsystem zur digitalen Werker-Unterstützung in der industriellen Produktion | A. Bannat, | Dissertation, TUM - Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2014 |

| | | | |
|----|--|--|--|
| 28 | Approach for the development of an adaptive worker assistance system based on an individualized profile data model | N. Galaske, R. Anderl | Advances in Ergonomics of Manufacturing (AISC), Volume 490, 2016 DOI 10.1007/978-3-319-41697-7_47 |
| 29 | Towards Optimal Worker Assistance: Investigating Cognitive Processes in Manual Assembly | C. Stößel, M. Wiesbeck, S. Stork, M. Zäh, A. Schubö | 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2008 DOI 10.1007/978-1-84800-267-8_50 |
| 30 | A Model for Adaptively Generating Assembly Instructions Using State-based Graphs | M. Zäh, M. Wiesbeck | 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2008 DOI 10.1007/978-1-84800-267-8_39 |
| 31 | Employee data model for flexible and intelligent assistance systems in smart factories | A. Arndt, R. Anderl | 7th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE), 2016 DOI 10.1007/978-3-319-41697-7_44 |
| 32 | Keeping Track of the Physical in Assembly Processes | S. Erol, P. Hold | 20 th IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Workshop (EDOCW), 2016 DOI 10.1109/EDOCW.2016.7584365 |
| 33 | Worker information system to support during complex and exhausting assembly of high-voltage harness | C. Fischer, J. Böning, J. Franke, M. Lušić, R. Hornfeck | 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC), 2015 DOI 10.1109/EDPC.2015.7323211 |
| 34 | Application-specific design of assistance systems for manual work in production | L. Merkel, C. Berger, C. Schultz, S. Braunreuther G. Reinhart | IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2017 DOI 10.1109/IEEM.2017.8290080 |
| 35 | Usage Frequency and User-Friendliness of Mobile Devices in Assembly | S. Vernim, G. Reinhart | Procedia CIRP, Volume 57, 2016 DOI 10.1016/j.procir.2016.11.088 |
| 36 | Worker centered cognitive assistance for dynamically created repairing jobs in rework area | R. Müller, M. Vette-Steinkamp, L. Hörauf, C. Speicher, A. Bashir | Procedia CIRP, Volume 72, 2018 DOI 10.1016/j.procir.2018.03.137 |
| 37 | Smart Information Visualization for First-Time Quality within the Automobile Production Assembly Line | M. Gewohn, J. Beyerer, T. Usländer, G. Sutschet | IFAC-PapersOnLine, Volume 51, Issue 11, 2018 DOI 10.1016/j.ifacol.2018.08.333 |
| 38 | Static Versus Dynamic Provision of Worker Information in Manual Assembly | M. Lušić, C. Fischer, K. Schmutzer-Braz, M. Alam, J. Franke | Procedia CIRP, Volume 57, 2016 DOI 10.1016/j.procir.2016.11.087 |
| 39 | Consistent data Usage and Exchange Between Virtuality and Reality to Manage Complexities in Assembly Planning | R. Müller, M. Vette, L. Hörauf, C. Speicher | Procedia CIRP, Volume 44, 2016 DOI 10.1016/j.procir.2016.02.126 |
| 40 | A Concept towards Automated Data-Driven Reconfiguration of Digital Assistance Systems | G. Reisinger, T. Komenda, P. Hold, W. Sihn | Procedia Manufacturing, Volume 23, 2018 DOI 10.1016/j.promfg.2018.03.168 |
| 41 | Echtzeitfähiges Werkerassistenzsystem für die manuelle Montage 4.0 | A. Kröger, R. Vierfuß | ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Band 111, Heft 5, 2016 DOI 10.3139/104.111512 |

| | | | |
|----|---|---|---|
| 42 | Worker Information Systems Including Dynamic Visualisation: A Perspective for Minimising the Conflict of Objectives between a Resource-Efficient Use of Inspection Equipment and the Cognitive Load of the Worker | M. Lusic, K. Schmutzer-Braz, S. Wittmann, C. Fischer, R. Hornfeck, J. Franke | Advanced Materials Research, Volume 1018, 2014 DOI 10.4028/ AMR.1018.23 |
| 43 | One size does not fit all: challenges of providing interactive worker assistance in industrial settings | T. Kosch, Y. Abdelrahman, M. Funk, A. Schmidt | Proceedings of the 2017 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers, 2017 DOI 10.1145/3123024.3124395 |
| 44 | Towards an Augmented Reality and Sensor-Based Assistive System for Assembly Tasks | J. Wolfartsberger, J. Zenisek, M. Silmbroth, C. Sievi | Proceedings of the 10th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments PETRA, 2017 DOI 10.1145/3056540.3064969 |
| 45 | Assistive systems in production environments: exploring motion recognition and gamification | O. Korn A. Schmidt T. Hörz | Proceedings of the 5th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments PETRA, 2012 DOI 10.1145/2413097.2413109 |
| 46 | Using Head-Mounted Displays and In-Situ Projection for Assistive Systems: A Comparison | S. Büttner, M. Funk, O. Sand, C. Röcker | Proceedings of the 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments PETRA, 2016 DOI 10.1145/2910674.2910679 |
| 47 | ABBAS: An Adaptive Bio-sensors Based Assistive System | M. ElKomy Y. Abdelrahman, M. Funk. T. Dinger | Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, 2017 DOI 10.13140/RG.2.2.23462.93764 |
| 48 | Learn but work! Towards self-directed learning at mobile assembly workplaces | M. Aehnelt K. Wegner | Proceedings of the 15th International Conference on Knowledge Technologies and Data-driven Business (i-KNOW), 2015 DOI 10.1145/2809563.2809577 |
| 49 | Extending the Design Space in Industrial Manufacturing Through Mobile Projection | S. Büttner, O. Sand, C. Röcker | Proceedings of the 17th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services Adjunct, 2015 DOI 10.1145/2786567.2794342 |
| 50 | Processing manufacturing knowledge with ontology-based annotations and cognitive architectures | R. Alm, M. Aehnelt, B. Urban | Proceedings of the 15th International Conference on Knowledge Technologies and Data-driven Business (i-KNOW), 2015 DOI 10.1145/2809563.2809576 |
| 51 | Haptic, Auditory, or Visual? Towards Optimal Error Feedback at Manual Assembly Workplaces | M. Funk J. Heusler, E. Akcay K. Weiland | Proceedings of the 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments PETRA, 2016 DOI 10.1145/2910674.2910683 |
| 52 | Experiences with an Assistive System for Manual Assembly | J. Hallewell Haslwanter B. Blazeovski | Proceedings of the 11th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments PETRA, 2018, DOI 10.1145/3197768.3203173 |

| | | | |
|----|--|---|--|
| 53 | Industrial Perspectives on Assistive Systems for Manual Assembly Tasks | J. Wolfartsberger et al. | Proceedings of the 11th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments Conference, 2018, DOI 10.1145/3197768.3201552 |
| 54 | Developing a Mixed Reality Assistance System Based on Projection Mapping Technology for Manual Operations at Assembly Workstations | L. Rodriguez, F. Quint, D. Gorecky, D. Romero, H. Siller | Procedia Computer Science, Volume 75, 2015 DOI 10.1016/j.procs.2015.12.254 |
| 55 | RFID-assisted assembly guidance system in an augmented reality environment | J. Zhang, S. K. Ong, A.Y.C. Nee | International Journal of Production Research, Volume 49, Issue 13, 2011 DOI 10.1080/00207543.2010.492802 |
| 56 | An assembly line information system study | K. Case, G. Bäckstrand, D. Högberg, P. Thorvald, L. J. De Vin | Proceedings of the 6th International Conference on Manufacturing Research (ICMR2008), Vol. 1, Brunel University, London, UK, 2008 ISBN 9781902316604 |
| 57 | The impact of information presentation on work environment and product quality: a case study | K. Case, G. Bäckstrand, D. Högberg, P. Thorvald, L. J. De Vin | Proceedings of the 2008 40th Annual Nordic Ergonomics Society Conference (NES 2008): ergonomics is a lifestyle, Reykjavik, Iceland, 2008 |
| 58 | Using mobile information sources to increase productivity and quality | P. Thorvald, A. Brolin, D. Högberg, K. Case | 3rd International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics AHFE, 2010 DOI 10.1201/EBK1439834916-c46 |
| 59 | Mechanical assembly assistance using marker-less augmented reality system | Y. Wang, S. Zhang, S. Yang, W. He, X. Bai | Assembly Automation, Vol. 38, Issue: 1, 2018 DOI 10.1108/AA-11-2016-152 |
| 60 | Comparing Google Glass with Tablet-PC as Guidance System for Assembling Tasks | M. Wille, P. Scholl, S. Wischniewski, K. Van Laerhoven | 11th IEEE International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks Workshops, 2014 DOI 10.1109/BSN.Workshops.2014.11 |
| 61 | Planning and Evaluation of Digital Assistance Systems | P. Hold, S. Erol, G. Reisinger, W. Sihn | Procedia Manufacturing, Volume 9, 2017 DOI 10.1016/j.promfg.2017.04.024 |
| 62 | Applying data of historical defects to increase efficiency of rework in assembly | W. Tönnnes | Procedia CIRP Volume 72, 2018 DOI 10.1016/j.procir.2018.03.086 |
| 63 | Planning Operator Support in Cyber-Physical Assembly Systems | P. Hold, F. Ranz, W. Sihn, V. Hummel | IFAC-PapersOnLine, Volume 49, Issue 32, 2016 DOI 10.1016/j.ifacol.2016.12.190 |
| 64 | Ontological Model for Managing Context-aware Assembly Instructions | A. Claeys, S. Hoedt, M. Schamp, H. Van Landeghem, J. Cottyn | IFAC-PapersOnLine, Volume 51, Issue 11, 2018 DOI 10.1016/j.ifacol.2018.08.254 |
| 65 | Progress Monitoring and Gesture Control in Manual Assembly Systems Using 3D-image Sensors | S. Kaczmarek, S. Högrevé, K. Tracht | Procedia CIRP, Volume 37, 2015 DOI 10.1016/j.procir.2015.08.006 |
| 66 | Data and Information Handling in Assembly Information Systems – A Current State Analysis | P. Johansson, M. Enofe, M. Schwarzkopf, | Procedia Manufacturing, Volume 11, 2017 DOI 10.1016/j.promfg.2017.07.335 |

| | | | |
|----|---|--|---|
| | | L. Malmsköld, L. Moestam | |
| 67 | Interoperability for a Dynamic Assembly System | M. Åkerman, Å. Fast-Berglund, S. Ekered | Procedia CIRP Volume 44, 2016 DOI 10.1016/j.procir.2016.02.026 |
| 68 | Modularized assembly system: A digital innovation hub for the Swedish Smart Industry | M. Åkerman, Å. Fast-Berglund, E. Halvordsson, J. Stahrea | Manufacturing Letters, Volume 15, Part B, 2018 DOI 10.1016/j.mfglet.2018.01.004 |
| 69 | Automated vision-based live ergonomics analysis in assembly operations | J. Krüger, T. D. Nguyen | CIRP Annals, Volume 64, Issue 1, 2015 DOI 10.1016/j.cirp.2015.04.046 |
| 70 | Teaching Smart Production: An Insight into the Learning Factory for Cyber-Physical Production Systems (LVP) | L. Merkel, J. Atug, L. Merhar, C. Schultz, S. Braunreuther, G. Reinhart | Procedia Manufacturing, Volume 9, 2017 DOI 10.1016/j.promfg.2017.04.034 |
| 71 | Framework for Evaluating Cognitive Support in Mixed Model Assembly Systems | A. Claeys, S. Hoedt, N. Soete, H. Van Landeghem, J. Cottyn | IFAC-PapersOnLine, Volume 48, Issue 3, 2015 DOI 10.1016/j.ifacol.2015.06.201 |
| 72 | Generic Model for Managing Context-Aware Assembly Instructions | A. Claeys, S. Hoedt, H. Van Landeghem, J. Cottyn | IFAC-PapersOnLine, Volume 49, Issue 12, 2016 DOI 10.1016/J.IFACOL.2016.07.666 |
| 73 | Complexity-focused Planning and Operating of Mixed-model Assembly Lines in Automotive Manufacturing | S. Keckl, A. Abou-Haydar, E. Westkämper | Procedia CIRP, Volume 57, 2016 DOI 10.1016/j.procir.2016.11.058 |
| 74 | A spatiotemporal information management framework for product design and assembly process planning reconciliation | E. Gruhiera, F. Demolyb, S. Gomesb | Computers in Industry, Volume 90, 2017 DOI 10.1016/j.compind.2017.04.004 |
| 75 | Development of a learning factory concept to train participants regarding digital and human centered decision support | H. Oberc, M. Reuter, M. Wannöffel, B. Kuhlenkötter | Procedia Manufacturing, Volume 23, 2018 DOI 10.1016/j.promfg.2018.04.011 |
| 76 | Multi-variant Truck Production - Product Variety and its Impact on Production Quality in Manual Assembly | P. Johansson, S. Mattsson, L. Moestam, Å. Fast-Berglund | Procedia CIRP, Volume 54, 2016 DOI 10.1016/j.procir.2016.05.062 |
| 77 | Wireless information system for rotating operators in human-based assembly lines | Makris, Sotiris; Michalos, George; Chryssolouris, George | International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Volume 28, Issue 11, 2015 DOI10.1080/0951192X.2014.962615 |
| 78 | Towards a model to identify the need and the economic efficiency of digital assistance systems in cyber-physical assembly systems | P. Hold, W. Sihn | 1st International Workshop on Cyber-Physical Production Systems (CPPS), IEEE, 2016 DOI 10.1109/CPPS.2016.7483914 |
| 79 | From Information Assistance to Cognitive Automation: A Smart Assembly Use Case | M. Aehnelt, S. Bader | 7th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART), 2015 DOI 10.1007/978-3-319-27947-3_11 |
| 80 | User-Centric Workflow Ergonomics in Industrial Environments Concept and Architecture of anAssistance System | C. Di Valentin, A. Emrich, D. Werth, et al. | International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), 2015 DOI 10.1109/CSCI.2015.116 |

| | | | |
|----|---|--|--|
| 81 | Comparing Video and Augmented Reality Assistance in Manual Assembly | F. Loch, F. Quint, I. Brishtel | 12th International Conference on Intelligent Environments (IE), 2016 DOI 10.1109/IE.2016.31 |
| 82 | Contextualization and Recommendation of Annotations to Enhance Information Exchange in Assembly Assistance | R. Alm | Journal of universal computer science (JUCS), Vol. 23, 2017 DOI: 10.3217/JUCS-023-09-0932 |
| 83 | Planning and simulation of high-voltage energy storage assembly for automotive industry from scalable product concepts via assembly planning and material flow simulation through to web-based assembly information | J. Boenig, C. Fischer, M. Brandmeier, et al. | Advanced Materials Research, Volume 769, 2013 DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.769.42 |
| 84 | The effect of information mobility on production quality | Thorvald, Peter; Hogberg, Dan; Case, Keith | International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Volume 27, Issue 2, 2014 DOI 10.1080/0951192X.2013.800236 |
| 85 | Multi-modal augmented-reality assembly guidance based on bare-hand interface | X. Wang, S. K. Ong, A. Y. C. Nee | Advanced Engineering Informatics, Volume 30, Issue 3, 2016 DOI 10.1016/j.aei.2016.05.004 |
| 86 | Evaluation of Attention Guiding Techniques for Augmented Reality-based Assistance in Picking and Assembly Tasks | P. Renner, T. Pfeiffer | Proceedings of the 22nd International Conference on Intelligent User Interfaces, 2017 DOI 10.1145/3030024.3040987 |
| 87 | smARt.Assembly – Projection-Based Augmented Reality for Supporting Assembly Workers | O. Sand, S. Büttner, V. Paelke, C. Röcker | Virtual, Augmented and Mixed Reality VAMR 2016, International Conference on Human-Computer Interaction, 2016 DOI 10.1007/978-3-319-39907-2_61 |
| 88 | User Interfaces for Cyber-Physical-Systems - Challenges and Approaches. | V. Paelke, S. Heymann | International Conference of Design, User Experience, and Usability, 2015 DOI 10.1007/978-3-319-20886-2_8 |
| 89 | Information Assistance for Smart Assembly Stations | M. Aehnelt, S. Bader | 7th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, 2015 DOI 10.5220/0005216501430150 |
| 90 | Comparing Tactile, Auditory, and Visual Assembly Error-Feedback for Workers with Cognitive Impairments | T. Kosch, R. Kettner, M. Funk, A. Schmidt | Proceedings of the 18th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility, 2016 DOI 10.1145/2982142.2982157 |
| 91 | Pose Estimation for a Cuboid with Regular Patterns in an Interactive Assembly-support Projection System | Y. Obinata, G. Suzuki, T. Murase, Y. Fujii | Proceedings of the 2016 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, 2016 DOI 10.1145/2992154.2996776 |
| 92 | Augmented manufacturing: a study with impaired persons on assistive systems using in-situ projection | O. Korn, A. Schmidt T. Hörz | Proceedings of the 6th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments PETRA, 2013 DOI 10.1145/2504335.2504356 |
| 93 | Comparing projected in-situ feedback at the manual assembly workplace with impaired workers | M. Funk, A. Bächler, L. Bächler, O. Korn, C. Krieger, T. Heidenreich, A. Schmidt | Proceedings of the 8th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments PETRA, 2015 DOI 10.1145/2769493.2769496 |
| 94 | Working with Augmented Reality?: A Long-Term Analysis of In- | M. Funk, A. Bächler, L. Bächler, | Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments |

| | | | |
|-----|---|---|---|
| | Situ Instructions at the Assembly Workplace | T. Kosch, T. Heidenreich, A. Schmidt | PETRA, 2017 DOI 10.1145/3056540.3056548 |
| 95 | Unsupervised Workflow Extraction from First-Person Video of Mechanical Assembly | T.-A. Pham, Y. Xiao | HotMobile '18 Proceedings of the 19th International Workshop on Mobile Computing Systems & Applications, 2018 DOI 10.1145/3177102.3177112 |
| 96 | Illustrating how mechanical assemblies work | N. Mitra, Y.-L. Yang, D.-M. Yan, W. Li, M. Agrawala | ACM Transactions on Graphics, Volume 29, Issue 4, 2010 DOI 10.1145/1778765.1778795 |
| 97 | Comparing Conventional and Augmented Reality Instructions for Manual Assembly Tasks | J. Blattgerste, B. Streng, P. Renner, T. Pfeiffer, K. Essig | Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, PETRA, 2017 DOI 10.1145/3056540.3056547 |
| 98 | COGNITO - A cognitive assistance and training system for manual tasks in industry | D. Gorecky, S. Worgan, G. Meixner | ECCE '11 Proceedings of the 29th Annual European Conference on Cognitive Ergonomics, 2011 DOI 10.1145/2074712.2074723 |
| 99 | Evaluating the training transfer of Head-Mounted Display based training for assembly tasks | S. Werrlich, P.-A. Nguyen, G. Notni | Proceedings of the 11th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments PETRA, 2018 DOI 10.1145/3197768.3201564 |
| 100 | Towards assembly steps recognition in augmented reality | A. Rukubayihunga, J.-Y. Didier, S. Otmane | VRIC '16: Proceedings of the 2016 Virtual Reality International Conference, 2016 DOI 10.1145/2927929.2927953 |
| 101 | Smart sensing for real-time pose estimation, assembly, and inspection using 3D laser scanning systems | C. English | PerMIS '10: Proceedings of the 10th Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop, 2010 DOI 10.1145/2377576.2377627 |
| 102 | Towards Optimal Worker Assistance -- A Framework for Adaptive Selection and Presentation of Assembly Instructions | A. Bannat, F. Wallhoff, G. Rigoll, et al. | Proceedings of the 1st International Workshop on Cognition for Technical Systems, 2008 https://mediatum.ub.tum.de/980076 |
| 103 | A methodology to increase added value in manual assembly of complex systems | J. Henke | Dissertation, Fraunhofer IPA, 2015 ISBN: 978-3-8396-0964-4 |
| 104 | Event cognition at the workplace: perceiving, understanding, and practicing assembly tasks | K. Sebastian | Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2015 http://d-nb.info/107826130X |
| 105 | Worker of the future: Assistance in the age of industry 4.0 | M. Aehnelt, A. Müller | VDE-Kongress Internet der Dinge: Technologien, Anwendungen, Perspektiven, 2016 ISBN: 978-3-8007-4308-7 |
| 106 | A method for the semantically supported ramp-up of assembly system | K. Konrad | Dissertation, Fraunhofer IPA, 2012 ISBN: 978-3-8396-0455-7 |
| 107 | Information presentation in manual assembly: a cognitive ergonomics analysis | P. Thorvald, G. Backstrand, D. Hogberg, L. De Vin, K. Case | Proceedings of the 40th Annual Nordic Ergonomics Society Conference, 2008 |
| 108 | Informationsassistent zur kognitiven Automatisierung manueller Montagearbeitsplätze | M. Aehnelt | Dissertation, Universität Rostock, 2017 DOI 10.18453/rosdok_id00001917 |

| | | | |
|-----|--|--|---|
| 109 | Support Systems on the Industrial Shop-floors of the Future: Operators' Perspective on Augmented Reality | A. Syberfeldt, M. Holm, O. Danielsson, et al. | 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS), Vol. 44, 2016 DOI 10.1016/j.procir.2016.02.017 |
| 110 | Synchronous AR assembly assistance and monitoring system based on ego-centric vision | X. Yin, X. Fan, W. Zhu, R. Liu | Assembly Automation, Volume 19, 2018 DOI 10.1108/AA-03-2017-032 |
| 111 | Innovative lean: work practices and product and process improvements | J. Angelis, B. Fernandes | International Journal of Lean Six Sigma, Volume 3, 2012 DOI 10.1108/20401461211223740 |
| 112 | Detection and estimation of mental fatigue in manual assembly process of complex products | H. Xiao, Y. Duan, Z. Zhang, M. Li | Assembly Automation, Volume 38, Issue 2, 2018 DOI 10.1108/AA-03-2017-040 |
| 113 | A knowledge-based system for process family planning | L. Zhang, Q. Xu, P. Helo | Journal of Manufacturing Technology Management, Volume 24, Issue2, 2013 DOI 10.1108/17410381311292296 |
| 114 | Root cause analysis support for quality improvement in electronics manufacturing | L. Huertas-Quintero, P. Conway, D. Segura-Velandia, A. West | Assembly Automation, Volume 31, Issue 1, 2011 DOI 10.1108/01445151111104155 |
| 115 | Self-classification of assembly database using evolutionary method | R. Iwańkiewicz, M. Taraska | Assembly Automation, Volume 38, Issue 3, 2018 DOI 10.1108/AA-06-2017-071 |
| 116 | Operators' mental strain induced by information support in cell production | M. Fujita, R. Kato, K. Watanabe, J. T. Chuan Tan, T. Arai | IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing, 2009 DOI 10.1109/ISAM.2009.5376904 |
| 117 | Wiring harness assembly detection system based on image processing technology | G. M. Shi, W. Jian | IEEE International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011 DOI 10.1109/ICECC.2011.6066493 |
| 118 | Extraction, Rendering and Augmented Interaction in the Wire Assembly of Commercial Aircraft | Mark Rice ; Hong Huei Tay ; Jamie Ng ; Senthil Kumar Selvaraj ; Calvin Lim ; Ellick Wu | 2016 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData), 2016 DOI 10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData.2016.83 |
| 119 | Estimating the position of parts of an automobile cowl cross bar assembly using CCD camera | Y.-S. Jang, S.-G. Lee, D.-H. Cha, J. Moon | IEEE International Symposium on Optomechatronic Technologies, 2009 DOI 10.1109/ISOT.2009.5326130 |
| 120 | Reprojection error as a new metric to detect assembly/disassembly maintenance tasks | A. Rukubayihunga, J.-Y. Didier, S. Otmane | International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA), 2015 DOI 10.1109/IPTA.2015.7367200 |
| 121 | Object Recognition and Augmentation for Wearable-Assistive System Using Egocentric RGB-D Sensor | G. Gao, K. Qian, X. Ma, J. Xia, H. Yu | IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), 2017 DOI 10.1109/CYBER.2017.8446467 |
| 122 | Motion Analysis System (MAS) for production and ergonomics | M. Bortolini, M. Faccio, | Computers & Industrial Engineering, |

| | | | |
|-----|---|--|---|
| | assessment in the manufacturing processes | M. Gamberi, F. Pilati | Volume 139, 2018 DOI 10.1016/j.cie.2018.10.046 |
| 123 | Automated work cycle classification and performance measurement for manual work stations | K. Bauters, J. Cottyn, D. Claeys, M. Slembrouck, H. van Landeghem | Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 51, 2018 DOI 10.1016/j.rcim.2017.12.001 |
| 124 | Visual Assembling Guidance Using Augmented Reality | A. Syberfeldt, O. Danielsson, M. Holm, L. Wang | Procedia Manufacturing, Volume 1, 2015 DOI 10.1016/j.promfg.2015.09.068 |
| 125 | Augmented reality system for operator support in human–robot collaborative assembly | S. Makris, P. Karagiannis, S. Koukas, A.-S. Matthaiakis | CIRP Annals, Volume 65, Issue 1, 2016 DOI 10.1016/j.cirp.2016.04.038 |
| 126 | Capture and Application of Adaptation Knowledge on Assembly Stations | D. Scrimieri, S. Ratchev | IFAC Proceedings Volumes, Volume 46, Issue 7, 2013 DOI 10.3182/20130522-3-BR-4036.00086 |
| 127 | Light-responsive RFID Tags for Precise Locating of Objects in Manual Assembly Verification Workshops | B. Gladysz, C. Lysiak | 48 th CIRP Conference on Manufacturing Systems CIRP CMS 2015, Procedia CIRP, Volume 41, 2016 DOI 10.1016/j.procir.2015.12.095 |
| 128 | Human cognition in manual assembly: Theories and applications | S. Stork, A. Schubö | Advanced Engineering Informatics, Volume 24, Issue 3, 2010 DOI 10.1016/j.aei.2010.05.010 |
| 129 | How to Support Intuition in Complex Assembly? | S. Mattsson, Å. Fast-Berglund | Procedia CIRP, Volume 50, 2016 DOI 10.1016/j.procir.2016.05.014 |
| 130 | Cognitive Automation Strategies – Improving Use-efficiency of Carrier and Content of Information | Å Fast-Berglund, M. Åkerman, M. Karlsson, V. G. Hernández, J. Stahre | Procedia CIRP, Volume 17, 2014 DOI 10.1016/J.PROCIR.2014.02.042 |
| 131 | Spatial Augmented Reality: an application for human work in smart manufacturing environment | M. Mengoni, S. Ceccacci, A. Generosi, A. Leopardi | Procedia Manufacturing, Volume 17, 2018 DOI 10.1016/j.promfg.2018.10.072 |
| 132 | Online Support for Shop-Floor Operators Using Body Movements Tracking | J. Provost, A. Ebrahimi, K. Åkesson | IFAC Proceedings Volumes, Volume 46, Issue 15, 2013 DOI 10.3182/20130811-5-US-2037.00077 |
| 133 | An Integrated Environment Based on Augmented Reality and Sensing Device for Manual Assembly Workstations | M. Dalle Mura, G. Dini, F. Failli | Procedia CIRP, Volume 41, 2016 DOI 10.1016/j.procir.2015.12.128 |
| 134 | Assembly system configuration through Industry 4.0 principles: the expected change in the actual paradigms | Y. Cohen, M. Faccio, F. G. Galizia, C. Mora, F. Pilati | IFAC-PapersOnLine, Volume 50, Issue 1, 2017 DOI 10.1016/j.ifacol.2017.08.2550 |
| 135 | Proactive assembly systems-realising the potential of human collaboration with automation | K. Dencker, Å. Fasth, J. Stahre, L. Mårtensson, H. Akillioglu | Annual Reviews in Control, Volume 33, Issue 2, 2009 DOI 10.1016/j.arcontrol.2009.05.004 |
| 136 | Research on assembly quality adaptive control system for complex mechanical products assembly process under uncertainty | X. Wang, M. Liu, M. Ge, L. Ling, C. Liu | Computers in Industry, Volume 74, 2015 DOI 10.1016/j.compind.2015.09.001 |

| | | | |
|-----|--|---|---|
| 137 | Relationship matrix based automatic assembly sequence generation from a CAD model | L.-M. Ou, X. Xu | Computer-Aided Design, Volume 45, Issue 7, 2013 DOI 10.1016/j.cad.2013.04.002 |
| 138 | Adaptive Assistance to Support and Promote Performance-impaired People in Manual Assembly Processes | M. Koelz, D. Jordon, P. Kurtz, et al. | 17th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS 2015), 2015 DOI 10.1145/2700648.2811367 |
| 139 | Application of the Assembly Skill Transfer System in an Actual Cellular Manufacturing System | F. Duan, J. Too Chuan; J. G. Tong, et al. | IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Volume 9, Issue 1, 2012 DOI 10.1109/TASE.2011.2163818 |
| 140 | A System Architecture for Assistance in Manual Tasks | F. Quint, F. Loch, M. Orfgen, et al. | 12th International Conference on Intelligent Environments (IE), 2016 DOI 10.3233/978-1-61499-690-3-43 |
| 141 | Exploring Design Opportunities for Intelligent Worker Assistance: A New Approach Using Projection-Based AR and a Novel Hand-Tracking Algorithm | S. Buettner, O. Sand, C. Roecker | 13th European Conference on Ambient Intelligence (Aml), 2017 DOI 10.1007/978-3-319-56997-0 |
| 142 | Augmented reality for assembly guidance using a virtual interactive tool | M. Yuan, S. K. Ong, A. Nee | International Journal of Production Research, Volume 46, Issue 7, 2008 DOI 10.1080/00207540600972935 |
| 143 | Hands-free wearable system for helping in assembly tasks in aerospace | D. Borro-Yagueez, J. Servan-Blanco, J. Cordero-Valle, et al. | Engineering Journal DYNA Volume 86, Issue 3, 2011 DOI 10.6036/3906 |
| 144 | A study on development of a work instruction system for assembly cells based on analysis of learning processes | Y. Tanimizu, S. Ishii, T. Yokotani | Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, Volume 8, Issue 4, 2014 DOI 10.1299/jamdsm.2014jamdsm0062 |
| 145 | Operator Monitoring System for Cell Production | F. Duan J. T. Tan, R. Kato, T. Arai | Advanced Robotics, Volume 23, Issue 10, 2008 DOI 10.1163/156855309X462637 |
| 146 | A Cognitive Assistance Framework for Supporting Human Workers in Industrial Tasks | Haslgrubler, Michael; Gollan, Benedikt; Ferscha, Alois | IT Professional, Volume 20, Issue 5, 2018 DOI 10.1109/MITP.2018.053891337 |
| 147 | Generation of Disassembly Directions Based on Component Mobility | R. Iacob, D. Popescu | Studies in Informatics and Control Volume 22, Issue 4, 2013 DOI 10.24846/v22i4y201306 |
| 148 | Software Sensor for Activity-Time Monitoring and Fault Detection in Production Lines | T. Ruppert, J. Abonyi | Sensors Volume 18, Issue 7, 2018 DOI 10.3390/s18072346 |
| 149 | Assessment based Information Needs in manual Assembly | P. E. C. Johansson, G. Eriksson, P. Johansson, et al. | 24th International Conference on Production Research (ICPR 2017), DES-tech Transactions on Engineering and Technology Research, 2017 DOI 10.12783/dtetr/icpr2017/17637 |
| 150 | A nonlinear contextually aware prompting system (N-CAPS) to assist workers with intellectual and developmental disabilities to perform factory assembly tasks: system overview and pilot testing | A. Mihailidis, M. Melonis, R. Keyfitz, et al. | Disability and rehabilitation-assistive Technology, Volume 11, Issue 7, 2016 DOI 10.3109/17483107.2015.1063713 |
| 151 | Rapid Prototyping for Assembly Training and Validation | A. Ahmad, S. Darmoul, W. Ameen, | IFAC-PapersOnLine, Volume 48, Issue 3, 2015 DOI 10.1016/j.ifacol.2015.06.116 |

| | | | |
|-----|---|---|---|
| | | M. H. Abidi, A. M. Al-Ahmari, | |
| 152 | Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess | A. Albers, M. Behrendt, S. Klingler, K. Matros | Handbuch Produktentwicklung, U. Lindemann (Hg.), Carl Hanser Verlag DOI 10.3139/9783446445819.019 |
| 152 | Improvement of manufacturing processes with virtual reality-based CIP workshops | J. Aurich, D. Ostermayer, C. H. Wagenknecht | International Journal of Production Research, Volume 47, Issue 19, 2009 DOI 10.1080/00207540701816569 |
| 153 | Mixed prototyping for product assessment: a reference framework | M. Bordegoni, U. Cugini, G. Caruso, S. Polistina | International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), Volume 3, Issue 3, 2009 DOI 10.1007/s12008-009-0073-9 |
| 154 | Data on the current state of problem solving and improvement during physical product development within complex (manufacturing) systems | P. Burggräf, T. Weißer, J. Wagner | Data in Brief, Volume 23, 2019 DOI 10.1016/j.dib.2019.103851 |
| 155 | Early reliability estimation in automotive industry | M. Kopp, D. Hofmann, B. Bertsche, C. Hey, O. Fritz | Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design, 2011 https://www.designsociety.org/publication/30758/EARLY+RELIABILITY+ESTIMATION+IN+AUTOMOTIVE+INDUSTRY |
| 156 | Method for an Enhanced Assembly Planning Process with Systematic Virtual Reality Inclusion | P. Winkes, J. Aurich | Procedia CIRP, Volume 37, 2017 DOI 10.1016/j.procir.2015.08.007 |
| 157 | Knowledge-based problem solving in physical product development—A methodological review | P. Burggräf, J. Wagner, T. Weißer | Expert Systems with Applications, Volume 5, 2020 DOI 10.1016/j.eswax.2020.100025 |
| 158 | Accuracy and Immersion Improvement of Hybrid Motion Capture based Real Time Virtual Validation | J. Böning, C. Fischer, H. Weckend, F. Döbereiner, J. Franke | Procedia CIRP, Volume 21, 2014 DOI 10.1016/j.procir.2014.03.191 |
| 159 | Manufacturability and validation methods in passenger car development – An industrial case study | M. Hesse, C. Weber | Proceedings of the DESIGN 2012 12th International Design Conference, Zagreb, Croatia, 2012 |
| 160 | On the track of human errors - Procedure and results of an innovative assembly planning method | R. Refflinghaus, C. Kern, | Procedia Manufacturing, Volume 21, 2018 DOI 10.1016/j.promfg.2018.02.106 |
| 161 | Virtual reality for assembly methods prototyping: a review | A. Seth, J. Vance, J. Oliver | Virtual Reality, Volume 15, Issue 1 DOI 10.1007/s10055-009-0153-y |
| 162 | Using action research to develop human factors approaches to improve assembly quality during early design and ramp-up of an assembly line | J. Village, F. Salustri, W. P. Neumann | International Journal of Industrial Ergonomics, Volume 61, 2017 DOI 10.1016/j.ergon.2017.05.006 |
| 163 | Continuous Failure Diagnosis for Assembly Systems using Rough Set Approach | K. Mannar, D. Ceglarek | CIRP Annals, Volume 53, 2004 DOI 10.1016/S0007-8506(07)60640-4 |
| 164 | Digital Planning Validation in automotive industry | Wöhlke, Günter; Schiller, Emmerich | Computers in Industry, Volume 56, Issue 4, 2005 DOI 10.1016/j.compind.2005.01.010 |

| | | | |
|-----|---|--|---|
| 165 | Increasing data integrity for improving decision making in production planning and control | G. Schuh, C. Reuter, J.-P. Prote, F. Brambring, J. Ays | CIRP Annals, Volume 66, Issue 1, 2017 DOI 10.1016/j.cirp.2017.04.003 |
| 166 | Learning and process improvement during production ramp-up | C. Terwiesch, R. Bohn | International Journal of Production Economics, Volume 70, Issue 1, 2001 DOI 10.1016/S0925-5273(00)00045-1 |
| 167 | Ansätze einer Produktionstheorie des Serienanlaufs | H. Dyckhoff, M. Müser, T. Renner, | ZfB (Zeitschrift für Betriebswirtschaft), Volume 82, Issue 12, 2012 DOI 10.1007/s11573-012-0631-7 |
| 168 | Reifegradbasierte Optimierung von Entwicklungsprozessen am Beispiel der produktionsbezogenen Produktabsicherung in der Automobilindustrie | M. Müller | Dissertation, Universität des Saarlandes, 2007 DOI 10.22028/D291-22430 |
| 169 | Ohne Prototypen schneller zum Ziel | K. Wattenberg, K. Mahler, L. Wiehe, et al. | ATZextra, Volume 17, Issue 4, 2012 DOI 10.1365/s35778-012-0744-1 |
| 170 | Virtuelle Entwicklung des neuen Audi A4 | T. Binder, S. Härdl, P. Kohoutek, | ATZextra, Volume 12, Issue 1, 2007 DOI 10.1365/s35778-007-0007-8 |
| 171 | Von der Entwicklung in die Serie | J. Kramer, | ATZextra, Volume 16, Issue 3, 2011 DOI 10.1365/s35778-007-0007-8 |
| 172 | Mobile Work Support for Field Service: A Literature Review and Directions for Future Research | M. Herterich, C. Peters, A. Neff, et al. | Wirtschaftsinformatik Proceedings 2015 DOI http://aisel.aisnet.org/wi2015/10 |
| 173 | Integrating Workers' Feedback into Continuous Information Flows: Enabling Lean Quality Assurance by Worker Information Systems | C. Fischer, M. Lušić, F. Faltus, J. Franke | Advanced Materials Research, Issue 1140, 2016 DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.1140.435 |

C. Protokoll der Fallstudie

| Fahrzeug | | Planzeit | Dauer | | | | | | | | | | | | |
|----------|--|----------|-------|----------|-------|-------|-------------|-------------------|------------------|--------------------|----------------|----------|----------------------|--------|--|
| ID | Besonderheiten | | Start | Ende | DLZ | DLZ | Arbeitszeit | Arbeitszeit [min] | Kern-Tätigkeiten | spezif. Nacharbeit | Doku-mentation | Logistik | Probleme / Wartezeit | Pausen | |
| A_01 | | 17,43 | 09:34 | 12:11 | 02:37 | 157 | 02:37 | 157 | 79 | 4 | 30 | 26 | 18 | 0 | |
| A_02 | | 17,40 | 09:30 | +1 09:18 | 23:48 | 1.428 | 07:48 | 463 | 96 | 0 | 37 | 25 | 305 | 0 | |
| A_03 | | 17,90 | 08:52 | 11:50 | 02:58 | 178 | 02:58 | 178 | 103 | 0 | 22 | 15 | 38 | 0 | |
| B_01 | | 17,60 | 07:48 | 11:14 | 03:26 | 206 | 02:54 | 142 | 73 | 8 | 15 | 24 | 22 | 32 | |
| B_02 | | 17,86 | 07:15 | 09:40 | 02:25 | 145 | 02:25 | 145 | 105 | 0 | 22 | 18 | 0 | 0 | |
| A_04 | Pulkwechsel | 18,60 | 12:10 | +1 08:50 | 20:20 | 1.220 | 04:40 | 280 | 142 | 0 | 15 | 24 | 99 | 0 | |
| B_03 | Stecker-Check | 17,85 | 07:43 | 11:52 | 04:09 | 239 | 03:21 | 201 | 118 | 0 | 10 | 28 | 45 | 38 | |
| B_04 | | 17,60 | 12:35 | 14:48 | 02:13 | 133 | 02:13 | 133 | 91 | 3 | 19 | 20 | 0 | 0 | |
| A_05 | | 18,60 | 06:38 | 10:29 | 03:51 | 231 | 03:19 | 184 | 136 | 0 | 33 | 15 | 0 | 32 | |
| B_05 | | 17,40 | 10:35 | 14:41 | 04:06 | 246 | 02:35 | 155 | 101 | 0 | 25 | 29 | 0 | 91 | |
| B_06 | | 18,15 | 08:26 | 10:44 | 02:18 | 138 | 02:01 | 121 | 70 | 0 | 23 | 20 | 8 | 17 | |
| A_06 | 1. RL Pulk 3A | 17,85 | 06:47 | 11:36 | 04:49 | 289 | 03:56 | 236 | 116 | 22 | 34 | 27 | 37 | 53 | |
| B_07 | | 15,73 | 12:16 | 14:48 | 02:32 | 152 | 02:32 | 152 | 92 | 7 | 27 | 26 | 0 | 0 | |
| B_08 | | 17,16 | 07:04 | 09:45 | 02:41 | 161 | 01:59 | 119 | 80 | 0 | 18 | 21 | 0 | 42 | |
| A_07 | | 17,40 | 09:50 | 14:38 | 04:48 | 288 | 04:11 | 244 | 114 | 19 | 14 | 30 | 67 | 37 | |
| B_09 | | 15,82 | 07:50 | 10:49 | 02:59 | 179 | 02:33 | 153 | 71 | 26 | 16 | 30 | 10 | 26 | |
| B_10 | | 16,14 | 11:55 | 14:22 | 02:27 | 147 | 02:27 | 147 | 65 | 0 | 15 | 28 | 39 | 0 | |
| A_08 | | 16,57 | 08:10 | 09:53 | 01:43 | 103 | 01:43 | 103 | 61 | 0 | 17 | 25 | 0 | 0 | |
| A_09 | | 17,60 | 10:05 | 14:34 | 04:29 | 269 | 03:34 | 214 | 96 | 38 | 23 | 27 | 30 | 55 | |
| B_11 | | 17,19 | 06:41 | 08:30 | 01:49 | 109 | 01:49 | 109 | 69 | 7 | 13 | 20 | 0 | 0 | |
| B_12 | | 17,19 | 09:07 | 10:57 | 01:50 | 110 | 01:50 | 110 | 60 | 6 | 12 | 20 | 12 | 0 | |
| A_10 | | 17,10 | 11:26 | 13:00 | 01:34 | 94 | 01:34 | 94 | 64 | 0 | 16 | 14 | 0 | 0 | |
| B_13 | Wartezeit für Doku und Vormontagen genutzt | 17,10 | 13:00 | 14:41 | 01:41 | 101 | 01:41 | 101 | 54 | 4 | 0 | 16 | 27 | 0 | |
| B_14 | | 17,10 | 08:12 | 10:27 | 02:15 | 135 | 02:00 | 120 | 68 | 17 | 10 | 25 | 0 | 15 | |
| A_11 | | 17,93 | 10:30 | 13:08 | 02:38 | 158 | 01:52 | 112 | 53 | 33 | 12 | 14 | 0 | 46 | |
| B_15 | Wartezeit für Doku und Vormontagen genutzt | 16,19 | 13:08 | 14:43 | 01:35 | 95 | 01:35 | 95 | 57 | 16 | 0 | 13 | 9 | 0 | |
| B_16 | | 17,93 | 06:47 | 08:15 | 01:28 | 88 | 01:28 | 88 | 58 | 0 | 12 | 18 | 0 | 0 | |
| A_12 | | 17,19 | 08:15 | 10:36 | 02:21 | 141 | 01:48 | 108 | 77 | 4 | 15 | 12 | 0 | 33 | |
| B_17 | | 15,82 | 10:36 | 12:01 | 01:25 | 85 | 01:25 | 85 | 57 | 7 | 4 | 17 | 0 | 0 | |
| B_18 | | 16,46 | 12:58 | 14:35 | 01:37 | 97 | 01:25 | 85 | 46 | 0 | 15 | 24 | 0 | 12 | |
| A_13 | | 16,46 | 06:55 | 08:21 | 01:26 | 86 | 01:26 | 86 | 50 | 0 | 23 | 13 | 0 | 0 | |
| B_19 | | 15,82 | 08:25 | 10:16 | 01:51 | 111 | 01:19 | 79 | 57 | 0 | 5 | 17 | 0 | 32 | |
| B_20 | | 16,71 | 10:16 | 11:27 | 01:11 | 71 | 01:11 | 71 | 42 | 3 | 7 | 19 | 0 | 0 | |
| A_14 | | 17,93 | 12:17 | 14:08 | 01:51 | 111 | 01:26 | 86 | 53 | 5 | 14 | 14 | 0 | 25 | |
| B_21 | | 18,18 | 08:25 | 10:51 | 02:26 | 146 | 01:39 | 99 | 58 | 0 | 8 | 26 | 7 | 47 | |
| B_22 | | 16,65 | 11:37 | 12:43 | 01:06 | 66 | 01:06 | 66 | 44 | 5 | 5 | 12 | 0 | 0 | |
| A_15 | Wartezeit für Doku genutzt | 16,56 | 13:33 | 14:37 | 01:04 | 64 | 01:04 | 64 | 40 | 0 | 0 | 12 | 12 | 0 | |
| B_23 | | 17,34 | 07:05 | 09:10 | 02:05 | 125 | 02:05 | 125 | 62 | 0 | 15 | 23 | 25 | 0 | |
| B_24 | | 16,65 | 09:44 | 11:39 | 01:55 | 115 | 01:55 | 115 | 69 | 4 | 11 | 21 | 10 | 0 | |
| A_16 | | 18,18 | 12:15 | +1 08:10 | 19:55 | 1.195 | 03:39 | 219 | 57 | 105 | 18 | 14 | 25 | 0 | |
| B_25 | | 16,46 | 06:58 | 07:58 | 01:00 | 60 | 01:00 | 60 | 34 | 3 | 8 | 15 | 0 | 0 | |
| B_26 | | 16,71 | 08:00 | 10:07 | 02:07 | 127 | 01:24 | 84 | 60 | 0 | 8 | 16 | 0 | 43 | |
| A_17 | | 16,46 | 10:10 | 13:09 | 02:59 | 179 | 01:50 | 110 | 51 | 0 | 10 | 11 | 38 | 69 | |
| B_27 | 1. FZG Pulk 3B | 16,46 | 13:15 | 14:32 | 01:17 | 77 | 01:17 | 77 | 40 | 0 | 14 | 23 | 0 | 0 | |
| B_28 | | 16,69 | 09:30 | 10:38 | 01:08 | 68 | 01:08 | 68 | 41 | 0 | 10 | 17 | 0 | 0 | |
| A_18 | | 16,17 | 10:40 | 13:20 | 02:40 | 160 | 01:46 | 106 | 68 | 0 | 5 | 13 | 20 | 54 | |
| B_29 | | 17,19 | 13:20 | 14:28 | 01:08 | 68 | 01:08 | 68 | 45 | 0 | 5 | 18 | 0 | 0 | |
| B_30 | | 16,65 | 09:07 | 10:24 | 01:17 | 77 | 01:17 | 77 | 38 | 7 | 18 | 14 | 0 | 0 | |

D. Zugehörige studentische Arbeiten

Im Rahmen dieses Dissertationsprojekt entstanden in Kooperation mit verschiedenen Hochschulen studentische Arbeiten, deren Ergebnisse partiell in die vorliegende Dissertation eingeflossen sind. Die Arbeiten wurden unter wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors. Der Dank des Autors gilt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung der vorliegenden Arbeit.

Verena Pokrant: *„Szenarien für die technologische Unterstützung der Absicherung manueller Montageprozesse im Prototypenbau“*

Bachelor-Thesis an der Fakultät für Wirtschaftsingenieurwesen der Hochschule München, 2018.

Prüfer: Prof. Dr. Klaus Pischeltstrieder

Sebastian Kerker: *„Konzipierung eines Werker-Assistenz-Systems mit softwaregeführter Problemlösung für eine seriennahe Prototypenmontage“*

Master-Projektarbeit am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2019. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Selim Ben Zekri: *„Implementation of a sensor-based Worker-Assistance-System for the automotive prototype production“*

Master-Thesis an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München, 2019.

Prüfer: Prof. Dr. Majid Zamani

Julius Amecke-Mönnighoff: *„Optimization and Validation of Assembly Processes for the Series Production During the Manufacturing of Prototypes“*

Master-Thesis am Lehrstuhl für Unternehmensführung, Logistik und Produktion der Technischen Universität München, 2019.

Prüfer: Univ.-Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Horst Wildemann

Andreas Müller: *„Integration einer softwaregestützten Problemdokumentation und -analyse in ein Werkerassistenzsystem für die Prototypenmontage“*

Master-Thesis an der Fakultät für Informatik der Hochschule für angewandte Wissenschaften Augsburg, 2019.

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Christian Martin

E. Veröffentlichungen

Auszüge dieses Projekts wurden in folgenden Beiträgen veröffentlicht:

S. Rupp, R. Müller, S. Kerker, F. Faltus, J. Franke: „*Problemmanagement in Werker-Assistenz-Systemen - Entwicklung einer softwaregeführten Problemlösung für die Prototypenmontage*“

In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 115 (2020),
Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, ISSN 0947 – 0085,
DOI 10.3139/104.112264

S. Rupp, R. Müller: „*Worker assistance systems and assembly process maturity in the prototype and pre-series production*“

30th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2021), 15-18 June 2021, Athens, Greece.

In: Procedia Manufacturing, Volume 51, 2020, S. 1431-1438, Elsevier B.V.
DOI 10.1016/j.promfg.2020.10.199

S. Rupp, R. Müller: „*Worker assistance systems in the automotive prototype assembly – A case study*“

30th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2021), 15-18 June 2021, Athens, Greece.

In: Procedia Manufacturing, Volume 55, 2021, S. 350-357, Elsevier B.V.
DOI 10.1016/j.promfg.2021.10.049