

**Entwicklung einer fähigkeitsbasierten Planungsmethode zur Analyse der  
Wiederverwendbarkeit von Anlagen am Beispiel von Schraubprozessen  
in der Automobilendmontage**

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur**

**(Dr.-Ing.)**

von M.Sc. Jan Herzog

geb. am 04.02.1994 in Lohne

genehmigt durch die Fakultät Maschinenbau  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Arndt Lüder

Prof. Dr.-Ing. Stefan Biffel

Promotionskolloquium am 28.09.2023

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

## **Ehrenerklärung**

„Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen. Verwendete fremde und eigene Quellen sind als solche kenntlich gemacht.

Ich habe insbesondere nicht wissentlich:

- Ergebnisse erfunden oder widersprüchliche Ergebnisse verschwiegen,
- statistische Verfahren absichtlich missbraucht, um Daten in ungerechtfertigter Weise zu interpretieren,
- fremde Ergebnisse oder Veröffentlichungen plagiiert,
- fremde Forschungsergebnisse verzerrt wiedergegeben

Mir ist bekannt, dass Verstöße gegen das Urheberrecht Unterlassungs- und Schadensersatzansprüche des Urhebers sowie eine strafrechtliche Ahndung durch die Strafverfolgungsbehörden begründen kann.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die Dissertation ggf. mit Mitteln der elektronischen Datenverarbeitung auf Plagiate überprüft werden kann.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.“

## **Kurzfassung in Deutsch**

Die Massenproduktion wie die Automobilindustrie stellt sich zunehmend steigenden Trends wie z. B. kürzeren Produktlebenszyklen, einer steigenden Produktvarianz und abnehmenden Stückzahlen. Vor allem in der Automobilendmontage, in der zumeist mehrere Fahrzeuge auf einer Montagelinie gefertigt werden, resultieren hierdurch hohe Anforderungen an neue Produktionsanlagen sowie deren Komponenten und Technologien für die Automatisierung der Montageprozesse. Gleichzeitig wächst mit dem technologischen Fortschritt auch das Portfolio an möglichen Lösungen. Die Entwicklung neuer Produktionsanlagen stellt folgend einen immer komplexeren Prozess dar, in dem die Fähigkeiten einer Vielzahl von Komponenten und Technologien den verschiedenen Produkt- und Prozessanforderungen gegenüberzustellen sind. Häufig resultiert dies in spezifischen Produktionsanlagen, ausgelegt für die Anforderungen des jeweiligen Montageprozesses.

In diesem Zusammenhang wurde in dieser Arbeit ein Handlungsbedarf hinsichtlich der methodischen Steigerung der Wiederverwendung von Produktionsanlagen sowie deren Komponenten und Technologien abgeleitet. Zur Entwicklung und Identifikation wiederverwendbarer Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien ist dazu in dieser Arbeit ein zweistufiges Vorgehen am Fallbeispiel von Schraubprozessen erarbeitet worden. Im ersten Schritt wurde zunächst mit Hilfe einer fähigkeitsbasierten Planungsmethode und einer Modellierung von Produkt, Prozess, Ressource und Fähigkeiten (PPRS) ein Konzept für die gezielte Wiederverwendung von Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien entwickelt. Die fähigkeitsbasierte Planungsmethode adressiert in dieser Arbeit zugleich die steigende Komplexität innerhalb der Planung neuer Anlagen. Neben der Wiederverwendung und der methodischen Unterstützung der Planung ist zudem der Schwerpunkt der entwickelten Methode auf die Bündelung von Prozessen und Anlagen zur effizienten Auslegung von Automatisierungen gelegt worden.

Im zweiten Schritt der Arbeit liegt, aufbauend auf den einzelnen Wiederverwendungen der fähigkeitsbasierten Planung, der Fokus auf der Analyse und Bewertung der Wiederverwendbarkeit der Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien. Insgesamt konnten sechs Kriterien für die Bewertung der Wiederverwendbarkeit herausgestellt werden, mit denen eine ganzheitliche Bewertung ermöglicht wird. Innerhalb des Produktionsumfeldes der Automobilendmontage kann es z. B. aufgrund von Störgrößen zu neuen, vorher unbekanntem Anforderungen an Produktionsanlagen kommen. Mit Hilfe eines Kriteriums können diesbezüglich die einzelnen technischen Lösungen auf ihre Eignung für die zukünftigen Situationen des Produktionsumfeldes bewertet werden. Das zweistufige Vorgehen stellt zusammengefasst eine systematische Methode zur Steigerung der Wiederverwendung und Analyse der Wiederverwendbarkeit von Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien dar und wurde innerhalb der Arbeit über eine erste Anwendung validiert.

## **Abstract**

Mass production such as the automotive industry is increasingly facing trends such as shorter product life cycles, increasing product variance and decreasing output. Especially in the final automotive assembly, where several vehicles are usually produced on one assembly line, this development places high demands on new production facilities and their components and technologies for the automation of assembly processes. At the same time, the portfolio of possible production system components is growing together with the technological progress. The development of new production systems is a progressively complex process in which the capabilities of a large number of system components and technologies must be compared with the various product and process requirements. This often results in specific production systems designed for the requirements of the respective assembly process.

In this context, a need for action was derived in this work with regard to methodically increasing the reuse of production systems and their components and technologies. For the development and identification of reusable production systems, production system components and technologies, a two-stage procedure has been developed in this work using the example of bolting processes. In the first step, a concept for the targeted reuse of production systems, their components and technologies has been developed with the help of a skill-based planning method and product, process, resource and skill modelling (PPRS). Within the scope of this work, the skill-based planning method simultaneously addresses the increasing complexity within the planning of new production systems. In addition to the reuse and methodical support of planning, the developed method also focuses on the grouping of processes and modules of production systems for the efficient design of automations.

In the second step of the work, building on the individual reuses of skill-based planning, the reusability of the production systems and production system components are analyzed and evaluated. In total, six criteria for the evaluation of reusability could be identified, facilitating a holistic evaluation. Within the production environment of final automotive assembly, for example, new, previously unknown requirements for production systems can arise due to disturbance variables. With the help of a criterion, the individual production systems and production system components can be evaluated with regard to their suitability for future situations of the production environment. In summary, the two-stage procedure represents a methodical process for increasing the reuse and analysis of the reusability of production systems, production system components and technologies and was validated within this work via an initial application.

# Inhaltsverzeichnis

|  |     |
|--|-----|
| Abbildungsverzeichnis .....                                    | VII |
| Tabellenverzeichnis .....                                      | X   |
| Abkürzungsverzeichnis .....                                    | XI  |
| 1 Einleitung .....   | 1   |
| 1.1 Herausforderungen .....                                    | 1   |
| 1.2 Zielsetzung .....  | 3   |
| 1.3 Vorgehen und Aufbau der Arbeit .....                       | 4   |
| 2 Charakterisierung der Automobilendmontage.....               | 6   |
| 2.1 Produktstruktur von Fahrzeugen .....                       | 6   |
| 2.2 Produktionssystemstruktur der Automobilendmontage .....    | 7   |
| 2.3 Automatisierte Anlagen und Prozesse .....                  | 8   |
| 2.3.1 Synchronisierungsprozesse und -systeme .....             | 10  |
| 2.3.2 Schraubprozesse und -systeme .....                       | 13  |
| 3 Wiederverwendung im Engineering.....                         | 16  |
| 3.1 Definition Wiederverwendung & Wiederverwendbarkeit .....   | 16  |
| 3.2 Wiederverwendung im Engineering.....                       | 17  |
| 3.3 Arten der Wiederverwendung .....                           | 19  |
| 3.4 Wiederverwendungsgerechte Strukturen.....                  | 22  |
| 3.4.1 Produktstrukturtypen .....                               | 23  |
| 3.4.2 Modulare Architekturen .....                             | 25  |
| 3.5 Störgrößen auf die Wiederverwendung.....                   | 26  |
| 3.5.1 Eigenschaften wiederverwendbarer Module .....            | 27  |
| 3.5.2 Risiko der Rekonfiguration von Modulen.....              | 28  |
| 3.6 Relevante Methoden der Risikobeurteilung .....             | 30  |
| 3.7 Relevante Ansätze im Themenkomplex Wiederverwendung .....  | 32  |
| 3.8 Anforderungen an die Methode aus der Wiederverwendung..... | 35  |
| 4 Fähigkeitsbasierte Planung von Anlagen .....                 | 37  |
| 4.1 Allgemeiner Planungs- und Engineeringprozess.....          | 37  |
| 4.1.1 Planung automatisierter Montagelinien.....               | 37  |
| 4.1.2 Engineering von Anlagen nach der VDI 2206 .....          | 39  |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 4.1.3 | Anforderungen zur ganzheitlichen Anlagenplanung.....                   | 41  |
| 4.2   | Planung im Kontext der Digitalen Fabrik.....                           | 42  |
| 4.3   | Modellierung von Daten, Informationen und Wissen .....                 | 44  |
| 4.3.1 | Modellierung von Daten und Informationen.....                          | 45  |
| 4.3.2 | Modellierung von Wissen.....   | 46  |
| 4.3.3 | Verwaltungsschale Industrie 4.0.....                                   | 49  |
| 4.4   | Relevante Methoden zur Bündelung von Objekten.....                     | 50  |
| 4.5   | Relevante Ansätze im Themenkomplex fähigkeitsbasierte Planung.....     | 51  |
| 4.6   | Anforderungen an die Methode aus der fähigkeitsbasierten Planung ..... | 55  |
| 5     | Forschungsbedarf .....   | 56  |
| 5.1   | Zusammenfassung der Anforderungen an die Methode.....                  | 57  |
| 5.2   | Offene Forschungslücken der Analyse der Wiederverwendbarkeit .....     | 58  |
| 5.3   | Offene Forschungslücken der fähigkeitsbasierten Planung.....           | 62  |
| 5.4   | Zusammenfassung der Forschungsfragen .....                             | 64  |
| 6     | Lösungskonzept.....  | 67  |
| 6.1   | Gesamtkonzept der Planungsmethode.....                                 | 67  |
| 6.2   | Einordnung der Methode im Engineering nach der VDI 3695 .....          | 70  |
| 7     | Analyse der Wiederverwendbarkeit .....                                 | 72  |
| 7.1   | Kriterien zur Bewertung der Wiederverwendbarkeit .....                 | 72  |
| 7.1.1 | Anforderungen an Module der Automobilendmontage.....                   | 73  |
| 7.1.2 | Herleitung von Wiederverwendungskriterien .....                        | 76  |
| 7.2   | Risiko der Rekonfiguration von Modulen.....                            | 80  |
| 7.3   | Mensch-Maschine Faktor von Modulen.....                                | 85  |
| 7.4   | Kosten-Nutzen-Verhältnis .....   | 87  |
| 7.5   | Analyse des Wiederverwendungsgrades einzelner Module .....             | 90  |
| 8     | Fähigkeitsbasierte Planung der Wiederverwendung .....                  | 92  |
| 8.1   | Modellierung von PPRS .....  | 92  |
| 8.1.1 | Informationsmodell PPRS - Automobilendmontage.....                     | 93  |
| 8.1.2 | Attribute Anforderungsmodell .....                                     | 98  |
| 8.1.3 | Modellierung der Produkt-/ Prozessvarianz .....                        | 100 |
| 8.1.4 | Attribute Umweltmodell.....  | 102 |

|       |  |       |
|-------|--|-------|
| 8.2   | Fähigkeitsbasierte Konfiguration Anlagenkonzepte .....           | 106   |
| 8.2.1 | Relevante Ebenen von PPR für die Zuordnung.....                  | 107   |
| 8.2.2 | Ähnlichkeiten von Produkten & Prozessen.....                     | 109   |
| 8.2.3 | Bündelung von Produkten und Prozessen .....                      | 112   |
| 8.2.4 | Zuordnung und Optimierung von PPR.....                           | 115   |
| 8.2.5 | Detailkonzept zur Konfiguration von Anlagenkonzepten.....        | 122   |
| 8.3   | Entwicklung eines Integrationskonzepts .....                     | 125   |
| 8.3.1 | Restriktionen zur Bündelung von Montagestationen .....           | 126   |
| 8.3.2 | Detailkonzept zur Entwicklung eines Integrationskonzepts.....    | 130   |
| 9     | Methodenanwendung in der Automobilendmontage .....               | 133   |
| 9.1   | Modellierung des Fallbeispiels.....                              | 133   |
| 9.1.1 | Funktionsgruppe „Montageassistent“.....                          | 134   |
| 9.1.2 | Schraubprozesse – Kategorie A und B .....                        | 136   |
| 9.2   | Anwendung der fähigkeitsbasierten Planung .....                  | 138   |
| 9.2.1 | Konfigurierte Anlagenkonzepte .....                              | 138   |
| 9.2.2 | Integrationskonzept für den Montagelinienabschnitt 1 und 2 ..... | 142   |
| 9.2.3 | Diskussion der fähigkeitsbasierten Planung.....                  | 145   |
| 9.3   | Anwendung der Analyse der Wiederverwendbarkeit.....              | 148   |
| 9.3.1 | Risiko der Rekonfiguration des Montageassistenten.....           | 148   |
| 9.3.2 | Wiederverwendbarkeit der Montagestationen.....                   | 150   |
| 9.3.3 | Diskussion der Analyse der Wiederverwendbarkeit .....            | 152   |
| 9.4   | Modulorientierte Qualifizierung.....                             | 153   |
| 9.5   | Zusammenfassung offener Handlungsfelder .....                    | 154   |
| 10    | Zusammenfassung und Ausblick.....                                | 157   |
|       | Literaturverzeichnis .....                                       | XII   |
|       | Anhang 1: Ableitung Forschungsbedarf.....                        | XII   |
|       | Anhang 2: Bewertung Mensch-Maschine Faktor.....                  | XIII  |
|       | Anhang 3: Attribute Anforderungsmodell.....                      | XIV   |
|       | Anhang 4: Attribute Fähigkeiten .....                            | XVI   |
|       | Anhang 5: Regeln zur Zusammenfassung von Attributen.....         | XVII  |
|       | Anhang 6: Attribute Ressourcen.....                              | XVIII |



|   |        |
|---|--------|
| Anhang 7: Vorgehen zur Optimierung der Zuordnung von PPR .....  | XX     |
| Anhang 8: Regeln zur Konfiguration des Montageassistenten ..... | XXI    |
| Anhang 9: Schraubprozesse Montagelinienabschnitt 1 und 2.....   | XXII   |
| Anhang 10: Konfigurierte Anlagenkonzepte Montageassistent.....  | XXV    |
| Anhang 11: Weitere Anlagenkonzepte Montageassistent.....        | XXVII  |
| Anhang 12: Integrationskonzepte.....                            | XXVIII |
| Anhang 13: Mensch-Maschine Faktor .....                         | XXIX   |

# Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Aufbau und Einordnung der Arbeit nach Ulrich (in Anlehnung an Ulrich, Dyllick und Robst 1984) .....   | 5  |
| Abbildung 2: Produktstruktur eines Fahrzeuges (in Anlehnung an Löffler 2011).....  | 6  |
| Abbildung 3: Hierarchische Produktionssystemstruktur am Beispiel der Automobilendmontage (in Anlehnung an Hell 2018, Biffel, Lüder und Gerhard 2017, Roepke et al. 2016) ..... | 7  |
| Abbildung 4: Schematisches Layout Automobilendmontage (in Anlehnung an Weidemann 2017) .....   | 8  |
| Abbildung 5: Ressourcen von Schraubstationen in der Automobilendmontage (in Anlehnung an Schmidt 1992, Scholer 2018) .....   | 9  |
| Abbildung 6: Phasen des Synchronisationslaufs (in Anlehnung an Werner 2009).....   | 11 |
| Abbildung 7: Synchronisierungsprinzipien zwischen Handhabungs- und Fördersystem für die Montage im Fließbetrieb (in Anlehnung an Dirndorfer 1993) .....                        | 12 |
| Abbildung 8: Beispiele von Synchronisierungslösungen (in Anlehnung an ZeMA 2018, Universal Robots 2018, eMove360° 2020, Fuchslocher 2021) .....                                | 13 |
| Abbildung 9: Beispiele von Schraubsystemen (in Anlehnung an Weber 2018, Fiam 2019, Scholer 2018) .....   | 15 |
| Abbildung 10: Vorgehensmodell zur Wiederverwendung von Artefakten (VDI/ VDE 3695).....   | 18 |
| Abbildung 11: Wiederverwendung materieller und immaterieller Artefakte in den Lebensphasen (in Anlehnung an Biffel, Lüder und Gerhard 2017).....                               | 20 |
| Abbildung 12: Arten der Wiederverwendung materieller Artefakte.....  | 21 |
| Abbildung 13: Integrale und Modulare Produktarchitekturen (in Anlehnung an Skirde 2015, Ulrich 1995).....  | 26 |
| Abbildung 14: Wandlungsfähigkeit (in Anlehnung an Nyhuis 2008, Zäh, Möller und Vogl 2005).....   | 27 |
| Abbildung 15: Ansätze zur Analyse/ Bewertung der Wiederverwendung von Modulen ...  | 35 |
| Abbildung 16: Anforderungen ausgehend des Themenkomplexes Wiederverwendung ....  | 36 |
| Abbildung 17: Planung automatisierter Montagelinien (in Anlehnung an Bullinger et al. 1986).....   | 38 |
| Abbildung 18: V-Modell des Makrozyklus (VDI 2206).....   | 40 |
| Abbildung 19: Ganzheitliche Anlagenplanung innerhalb der Automobilendmontage .....   | 41 |
| Abbildung 20: Systematik der Begriffe Zeichen, Daten, Informationen und Wissen (in Anlehnung an Rehäuser und Kremer 2021).....   | 44 |
| Abbildung 21: PPR-Datenmodell (in Anlehnung an Drath 2010, Schleipen und Drath 2009) .....   | 46 |
| Abbildung 22: Industrie 4.0-Verwaltungsschale (VDI/ VDE 2015).....   | 50 |

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 23: Clusterverfahren (in Anlehnung an Cleve und Lämmel 2016,<br>Backhaus et al. 2015) .....                               | 51  |
| Abbildung 24: Ganzheitliche Anlagenplanung unter Einsatz einer fähigkeitsbasierten<br>Planung.....                                  | 55  |
| Abbildung 25: Zusammenfassung der Anforderungen an die Methode der Arbeit .....   | 57  |
| Abbildung 26: Vorgehen zur Beantwortung der Forschungslücken und Konzipierung<br>der Methode.....                                   | 66  |
| Abbildung 27: Gesamtkonzept der fähigkeitsbasierten Planungsmethode zur Analyse<br>der Wiederverwendbarkeit .....                   | 68  |
| Abbildung 28: Einordnung der Planungsmethode ins Engineering (in Anlehnung an<br>VDI/ VDE 3695, Jazdi et al. 2010, Hell 2018) ..... | 71  |
| Abbildung 29: Einordnung des Kapitels 7 in den Forschungskontext und das<br>Gesamtkonzept .....                                     | 72  |
| Abbildung 30: Anforderungen an Module innerhalb der Automobilendmontage .....   | 74  |
| Abbildung 31: Arten der Rekonfiguration von Modulen .....   | 81  |
| Abbildung 32: Bottom-up-Strategie zur Ermittlung des Risikos der Rekonfiguration.....   | 85  |
| Abbildung 33: Relevante Kostenursachen zur Bewertung und Auswahl von Modulen<br>(in Anlehnung an Herrmann 2010, VDI 2884) .....     | 87  |
| Abbildung 34: Analyse der Wiederverwendbarkeit eines einzelnen Moduls .....   | 91  |
| Abbildung 35: Einordnung des Kapitels 8.1 in den Forschungskontext und das<br>Gesamtkonzept .....                                   | 93  |
| Abbildung 36: PPRS Modell (in Anlehnung an Backhaus und Reinhart 2015) .....  | 95  |
| Abbildung 37: Detailansicht Anforderungsmodell Automobilendmontage.....   | 97  |
| Abbildung 38: Detailansicht Umweltmodell Automobilendmontage .....  | 98  |
| Abbildung 39: Teilprozesse und Operationen zum Schrauben von<br>Verbindungselementen.....   | 99  |
| Abbildung 40: Technische Attribute des Anforderungsmodells exemplarisch am<br>Beispiel Schrauben .....                              | 100 |
| Abbildung 41: Exemplarische Darstellung von Attributen erforderlicher Fähigkeiten ....  | 100 |
| Abbildung 42: Exemplarische Modellierung der Varianz der Anforderungen aus<br>Produkt und Prozess .....                             | 101 |
| Abbildung 43: Funktionsgruppen einer Schraubstation .....   | 103 |
| Abbildung 44: Beispiele von Komponenten einer Funktionsgruppe für den Teilprozess<br>Endverschrauben .....                          | 104 |
| Abbildung 45: Attribute eines Schraubers .....  | 105 |
| Abbildung 46: Einordnung des Kapitels 8.2 in den Forschungskontext und das<br>Gesamtkonzept .....                                   | 107 |
| Abbildung 47: Relevante Ebenen von PPR im Kontext der Konfiguration von<br>Anlagenkonzepten.....                                    | 109 |
| Abbildung 48: Attribute mit einer potentiellen Flexibilität.....  | 110 |

|  |       |
|--|-------|
| Abbildung 49: Vorgehen zur Bündelung von Teilprozessen in einer Montagestation .....                           | 114   |
| Abbildung 50: Zusammenfassung der Fähigkeiten von gebündelten Teilprozessen<br>(exemplarisch) .....            | 115   |
| Abbildung 51: Morphologischer Kasten zur Zuordnung von PPR (exemplarisch) .....                                | 118   |
| Abbildung 52: Idealisierter Prozess der Konfiguration von Anlagenkonzepten<br>abhängig der Anwendersicht ..... | 123   |
| Abbildung 53: Detailkonzept der fähigkeitsbasierten Konfiguration von<br>Anlagenkonzepten .....                | 125   |
| Abbildung 54: Einordnung des Kapitels 8.3 in den Forschungskontext und das<br>Gesamtkonzept .....              | 126   |
| Abbildung 55: Fragestellungen hinsichtlich der Bündelung von Montagestationen .....                            | 127   |
| Abbildung 56: Exemplarische Positionierung der Montagestationen im<br>Montagelinienabschnitt .....             | 131   |
| Abbildung 57: Detailkonzept zur Entwicklung eines Integrationskonzepts .....                                   | 132   |
| Abbildung 58: Funktionsgruppe „Montageassistent“ .....   | 134   |
| Abbildung 59: Architektur Funktionsgruppe Montageassistent .....   | 135   |
| Abbildung 60: Ruster für die Schraubprozesse des Montageassistenten .....                                      | 137   |
| Abbildung 61: Fügerangfolge Massemuttern & Airbagsteuergerät .....   | 138   |
| Abbildung 62: Anlagenkonzept Massemuttern Innenraum lösen & Airbagsteuergerät ...                              | 139   |
| Abbildung 63: Untersuchung des Toleranzausgleichs eines Schraubers für das Lösen<br>von Massemuttern .....     | 140   |
| Abbildung 64: Anlagenkonzepte Sicherheitsgurte .....   | 141   |
| Abbildung 65: Versuche Fußhebelwerk schrauben .....  | 142   |
| Abbildung 66: Anlagenkonzepte für den Vorderwagen .....  | 142   |
| Abbildung 67: Integrationskonzept Variante 2 – Montagelinienabschnitt 1 .....                                  | 144   |
| Abbildung 68: Integrationskonzept Variante 2 – Montagelinienabschnitt 2 .....                                  | 145   |
| Abbildung 69: Lösungen der Konfiguration bei fortlaufender Optimierung .....                                   | 146   |
| Abbildung 70: Konfigurationsvarianten eines Schraubers (exemplarisch) .....                                    | 147   |
| Abbildung 71: Risiko der Rekonfiguration des Montageassistenten .....  | 150   |
| Abbildung 72: Kosteneffekte ausgehend der fähigkeitsbasierten Planung .....                                    | 151   |
| Abbildung 73: Wiederverwendbarkeit des Montageassistenten .....  | 152   |
| Abbildung 74: CPS Risk Assessment Meta-Model (in Anlehnung an Biffel et al. 2021a)                             | 156   |
| Abbildung 75: Attribute einer Funktionsgruppe für das Ein- und Endverschrauben ....                            | XVIII |
| Abbildung 76: Attribute eines Roboters .....   | XVIII |
| Abbildung 77: Attribute eines Kamerasystems .....  | XIX   |
| Abbildung 78: Vorgehen zur Optimierung der Zuordnung von PPR .....   | XX    |

## Tabellenverzeichnis

|  |        |
|--|--------|
| Tabelle 1: Wiederverwendungsmechanismen (in Anlehnung an Schröck 2016, Röpke 2019).....                | 19     |
| Tabelle 2: Methoden zur Risikoidentifizierung (Röpke 2019).....  | 31     |
| Tabelle 3: Entscheidungstabelle (DIN 66241) .....  | 48     |
| Tabelle 4: Identifizierte Ansätze zur fähigkeitsbasierten Planung .....                                | 54     |
| Tabelle 5: Kriterien zur Analyse der Effektivität und Effizienz der Wiederverwendung von Modulen ..... | 79     |
| Tabelle 6: Exemplarische Einstufung der Eintrittswahrscheinlichkeit nach Bereichen.....                | 83     |
| Tabelle 7: Kosten und Nutzen im Kontext der Methode.....   | 90     |
| Tabelle 8: Sensitivitätsanalyse - Einfluss der Attribute auf die Kosten einer Montagestation.....      | 111    |
| Tabelle 9: Beispiele von Bedingungen für die Konfiguration von Schraubstationen .....                  | 116    |
| Tabelle 10:Ausschnitt - Program Board Montageassistent .....   | 154    |
| Tabelle 11: Erfüllungsgrad der Anforderungen.....  | XII    |
| Tabelle 12: Exemplarische Gewichtung Kriterien Mensch-Maschine Faktor .....                            | XIII   |
| Tabelle 13: Bewertungsskala Mensch-Maschine Faktor Engineering .....                                   | XIII   |
| Tabelle 14: Bewertungsskala Mensch-Maschine Faktor Nutzung/ Wartung.....                               | XIII   |
| Tabelle 15: Attribute zusammengesetzte Fähigkeiten.....  | XVI    |
| Tabelle 16: Attribute elementare Fähigkeiten seitens Produkt und Prozess .....                         | XVII   |
| Tabelle 17: Regeln zur Zusammenfassung von Attributen .....  | XVII   |
| Tabelle 18: Regeln zur Auswahl eines Manipulators.....   | XXI    |
| Tabelle 19: Schraubprozesse Teil 1 .....   | XXII   |
| Tabelle 20: Schraubprozesse Teil 2.....  | XXIII  |
| Tabelle 21: Schraubprozesse Teil 3.....  | XXIV   |
| Tabelle 22: Konfigurierte Anlagenkonzepte - Teil 1.....  | XXV    |
| Tabelle 23: Konfigurierte Anlagenkonzepte - Teil 2.....  | XXVI   |
| Tabelle 24: Anlagenkonzepte - Teil 3 .....   | XXVII  |
| Tabelle 25: Auswahl Montagestationen Montagelinienabschnitt 1 .....                                    | XXVIII |
| Tabelle 26: Auswahl Montagestationen Montagelinienabschnitt 2 .....                                    | XXVIII |
| Tabelle 27: Integrationskonzepte Montagelinienabschnitt 1 und 2.....                                   | XXIX   |
| Tabelle 28: Mensch-Maschine Faktor Montageassistent .....  | XXIX   |

## Abkürzungsverzeichnis

|      |  |
|------|--|
| AHP  | Analytischen-Hierarchie-Prozesses                    |
| CPPS | Cyber-physische Produktionssysteme                   |
| CPS  | Cyber physischen Systemen                            |
| DF   | Digitale Fabrik                                      |
| EHPV | Engineered Hours Per Vehicle                         |
| EO   | Engineering-Organisationen                           |
| ER   | Entity Relationship                                  |
| I4.0 | Industrie 4.0  |
| KMS  | Kraft-Momenten-Sensor                                |
| KNV  | Kosten-Nutzen-Verhältnis                             |
| KPI  | Key Performance Indicators (dt. Schlüsselkennzahlen) |
| LBR  | Leichtbauroboter                                     |
| MHK  | Montagehauptkörper                                   |
| MRK  | Mensch-Roboter-Kollaboration                         |
| MS   | Montagestation                                       |
| PI   | Program Increment                                    |
| PLM  | Product Lifecycle Management                         |
| PPR  | Produkt, Prozess, Ressource                          |
| PPRS | Produkt, Prozess, Ressource und Skills               |
| SAFe | Scaled Agile Framework                               |
| TCO  | Total Cost of Ownership                              |
| TCP  | Tool-Center-Points                                   |
| VBA  | Virtual Basic for Applications                       |
| WATT | Weighted Average Tact Time                           |

# 1 Einleitung

## 1.1 Herausforderungen

Mit den Megatrends der Globalisierung, Durchdringung neuer Technologien und kürzeren Produktlebenszyklen kommt es vor allem innerhalb der Massenproduktion wie z. B. der Automobilindustrie zu einer Veränderung des Produktionsumfeldes (Reinhart 2017, Abele und Reinhart 2011). Die hohe Volatilität der Märkte und die steigende Individualisierung der Produkte durch den Kunden führen zu einer hohen Produktvarianz und abnehmenden Stückzahlen in der Produktion (Reinhart 2017, Lotter und Wiendahl 2012, Walzl und Wildemann 2014). Hinzu kommt, dass produzierende Unternehmen aufgrund des wachsenden globalen Wettbewerbs einem zunehmenden Termin- und Kostendruck ausgesetzt sind (Reinhart 2017). Mit dem wachsenden Kostendruck steigen ebenfalls die Forderungen nach einer zunehmenden Automatisierung von Produktionsprozessen (Lay und Schirrmeister 2001). Voraussetzung für die Senkung der Produktionskosten ist jedoch eine hohe Auslastung der Produktionsanlagen bzw. hoher Nutzungsgrad dieser, der aufgrund der starken Schwankungen von Produktvarianten und Stückzahlen eine hohe Herausforderung darstellt (Westkämper und Zahn 2009).

Die Variantenbildung findet möglichst zum spätesten Zeitpunkt einer Wertschöpfungskette statt. In der Automobilindustrie ist dies die Endmontage, in der alle vorgelagerten Produktionsbereiche zusammenlaufen. Charakteristisch für die Endmontage sind in Folge dessen vor allem eine steigende Produktvarianz sowie abnehmende Stückzahlen (Lotter und Wiendahl 2012). Hinzu kommt, dass auf einer Montagelinie häufig mehrere verschiedene Fahrzeugmodelle und -varianten gleichzeitig produziert werden, wodurch sowohl Investitionskosten eingespart als auch Stückzahlschwankungen nivelliert werden sollen (Lotter und Wiendahl 2012, Hu et al. 2008, Weidemann 2017). Neben der hohen Produktvarianz und den Stückzahlschwankungen können weitere Störgrößen auf die Anlagen innerhalb der Endmontage einwirken, wie z. B. neue Strukturanforderungen aufgrund von neuen oder optimierten Prozessplänen. Die Anforderungen an Produktionsanlagen und deren Technologien sind über den gesamten Lebenszyklus zumeist zum Zeitpunkt der Umsetzung und Inbetriebnahme dieser nicht vollständig bekannt. Eine Flexibilität der Produktionsanlagen, also eine Auslegung für vorher bekannte Anforderungen, reicht daher häufig nicht aus und es besteht zunehmend der Bedarf einer Anpassungsfähigkeit bzw. Wandlungsfähigkeit der Anlagen (Reinhart 2017). Diese beschreibt die Fähigkeit der schnellen und effizienten strukturellen Anpassung der Anlagen auf neue, vorher unbekannte Anforderungen (Nyhuis 2008). Für die Aufrechterhaltung der Wettbewerbsfähigkeit, vor allem von Hochlohnländern, sind daher wandlungsfähigen Anlagen eine hohe Bedeutung zuzukommen (Nyhuis 2008, Westkämper und Zahn 2009).

Innerhalb des Engineerings von Anlagen werden die Produkteigenschaften sowie die Eigenschaften der notwendigen Herstellungsprozesse mit den technischen Fähigkeiten der Anlage, Anlagenkomponenten und Technologien verglichen (VDI 2221). Hierbei kommen die hohe Varianz unterschiedlicher Produktvarianten und die hohe Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten von Anlagenkomponenten und Technologien zum Tragen. In den letzten Jahren hat sich z. B. die Anzahl an Herstellern und deren Portfolio an Leichtbaurobotern (LBR), Kamerasystemen oder z. B. KI-basierten Softwarelösungen stark erhöht. Folgend stellt die Auswahl passender technologischer Lösungen einen komplexen und zeitintensiven Prozess dar (Drath 2010), der stark vom Wissen des Planers abhängt und bei dem häufig nicht alle möglichen Kombinationen betrachtet werden. Dies führt zumeist zu vielen individuellen Lösungen bzw. Produktionsanlagen, die jeweils spezifisch für einen einzelnen Montageprozess entwickelt wurden. Zudem müssen neue Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien häufig zuvor projektunabhängig während der Entwicklung konstruiert und erprobt werden (siehe (VDI/ VDE 3695)), wodurch sich ein hoher Aufwand bzgl. Kosten und Zeit einstellt. Im Hinblick auf eine hohe Produktvarianz innerhalb der Automobilendmontage und Heterogenität von Systemen entsteht so ein Handlungsbedarf zur Entwicklung und Identifikation von Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien, welche für mehrere Anwendungen in der Montage wiederverwendet werden können. Die Wiederverwendung von Anlagen sowie deren Komponenten und Technologien inkl. ihrer materiellen und immateriellen Artefakte führt so zu einer Steigerung der Effizienz des Engineerings und der Wirtschaftlichkeit von Automatisierungen (VDI/ VDE 3695). Voraussetzung für die Wiederverwendung von Anlagen ist dabei die Modularisierung und Standardisierung dieser (Gepp, Vollmar und Schaeffler 2014). Mit Hilfe der Standardisierung und Wiederverwendung von Anlagen für verschiedene Montageprozesse können so z. B. über Einmalaufwände Kosten und Zeit im Engineering und mit Hilfe von Skaleneffekten Kosten in der Beschaffung reduziert werden (Schuh 2012).

Die Entwicklung und Identifikation wiederverwendbarer Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien setzt voraus, dass bereits innerhalb des Anlagenengineerings eine Vielzahl von Montageprozessen betrachtet werden. Im Detail sind die technischen Fähigkeiten der Anlagenkomponenten und Technologien für die Anforderungen jedes einzelnen Montageprozesses zu überprüfen (Ko, Hu und Huang 2005). Neben der Überprüfung der Eignung für bekannte Anforderungen stellt sich speziell für das turbulente Produktionsumfeld der Automobilendmontage die Frage, welche technischen Lösungen für zukünftige, unbekannte Anforderungen am geeignetsten sind (Nyhuis 2008). Angelehnt an die Softwareentwicklung kann diese Eignung auch als Wiederverwendbarkeit bezeichnet werden (Ko, Hu und Huang 2005). Die Entwicklung wiederverwendbarer Anlagen führt jedoch unter Berücksichtigung der hohen Produktvarianz und Anzahl an Montageprozessen sowie dem steigenden Portfolio an möglichen technischen Lösungen zu einer signifikanten Erhöhung von Aufwand und



Komplexität innerhalb des Anlagenengineerings. Für die Entwicklung und Identifikation wiederverwendbarer Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien werden daher verstärkt digitale Modelle, Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik (DF) (VDI 4499) innerhalb des Engineerings gefordert. Eine Vielzahl von bereits existierenden Ansätzen aus der Forschung für die Unterstützung des Anlagenengineerings baut so auf einer Produkt, Prozess, Ressource und Fähigkeits Modellierung (PPRS Modellierung) auf (Kluge 2011, Smale und Ratchev 2009, Järvenpää 2012, Michniewicz 2019, Schleipen und Drath 2009). Basierend auf einer lösungsneutralen semantischen Beschreibung der Funktionalität von Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien (allg. Ressourcen) mit Hilfe von sogenannten Fähigkeiten (engl. skills) sowie der Beschreibung der Anforderungen ausgehend der Produkte und Prozesse, ist eine automatisierte bzw. semiautomatisierte Anlagenplanung möglich (Hammerstingl und Reinhart 2017).

### 1.2 Zielsetzung

Aus den beschriebenen Herausforderungen wurde deutlich, dass für eine Effizienzsteigerung des Anlagenengineerings in der Automobilendmontage die Steigerung der Wiederverwendung von Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien unabdingbar ist. Im Detail konnte ein Bedarf hinsichtlich der methodischen Entwicklung und Identifikation von wiederverwendbaren Anlagen und Anlagenkomponenten herausgestellt werden. Neben einem effizienten Engineering selbst besteht ebenfalls ein Bedarf nach wirtschaftlichen Anlagenkonzepten mit einem hohen Nutzungsgrad. Optimierte Anlagenkonzepte führen folgend zu einem höheren Automatisierungspotential und zahlen damit direkt auf die Wiederverwendung ein.

Innerhalb dieser Arbeit soll daher allgemein ein Beitrag zur methodischen Analyse der Wiederverwendbarkeit von Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien speziell für das Produktionsumfeld der Automobilendmontage erarbeitet werden. Die ganzheitliche Analyse und Bewertung der Wiederverwendbarkeit fordert hierbei, dass zuvor sämtliche Wiederverwendungen innerhalb des Engineerings überprüft werden. Hierfür soll in dieser Arbeit gezielt der Ansatz der fähigkeitsbasierten Planung basierend auf einer PPR Modellierung aufgegriffen werden, da dieser eine objektive Bewertung der Eignung von Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien für spezifische Montageprozesse bietet. Innerhalb der fähigkeitsbasierten Planung soll zudem eine Optimierung des Nutzungsgrades der Anlagen zur Steigerung der wirtschaftlichen Wiederverwendung berücksichtigt werden. Ausgehend der geplanten Wiederverwendungen sowie der Analyse zukünftiger Situationen des Produktionsumfeldes gilt es folgend die Wiederverwendbarkeit der Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien zu bewerten. Hieraus ergibt sich folgend die übergeordnete Forschungsfrage:

*Wie können wiederverwendbare Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien für das turbulente Produktionsumfeld der Automobilendmontage im Anlagenengineering ganzheitlich analysiert und bewertet werden?*

In diesem Zusammenhang stellt sich eingangs die Fragestellung nach der methodischen Planung der Wiederverwendungen der Anlagen mit Hilfe der Modellierung von PPR. Aufbauend hierauf ergibt sich die Fragestellung nach der Analyse der Wiederverwendbarkeit der einzelnen Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien.

*Wie kann eine fähigkeitsbasierte Planung von Anlagen für die Automobilendmontage durchgeführt werden, unter Berücksichtigung der Komplexität ausgehend der Produktvarianz und den technologischen Alternativen?*

*Wie kann die Wiederverwendbarkeit von Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien unter Berücksichtigung zukünftiger Situationen des Produktionsumfeldes der Automobilendmontage analysiert werden?*

Zur Beantwortung dieser Fragen wird im Folgenden eine Methode entwickelt, die durch die Analyse der Wiederverwendungen und Wiederverwendbarkeit eine gezielte Steigerung der Wiederverwendungen von Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien sowie der Effizienz des Anlagenengineerings ermöglicht. Der Fokus wird in dieser Arbeit dafür speziell auf Schraubprozesse gelegt, da Schraubprozesse mit ca. 2000 Prozessen den mit Abstand häufigsten Fügeprozess in der Automobilendmontage darstellen und dadurch unmittelbar eines der größten Potentiale für eine hohe Wiederverwendung von Anlagen besitzen (Feldmann, Schöppner und Spur 2014).

### **1.3 Vorgehen und Aufbau der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit ist der angewandten Wissenschaft zuzuordnen. Der Aufbau der Arbeit orientiert sich dabei am anwendungsorientierten Forschungsvorgehen nach (Ulrich, Dyllick und Robst 1984) (siehe Abbildung 1). Ergebnis der konstruktiven Dissertation ist eine fähigkeitsbasierte Planungsmethode für die Analyse der Wiederverwendbarkeit von Anlagen im Anlagenengineering. Deduktiv wird hierfür in dieser Arbeit ein generisches Gesamtkonzept für eine fähigkeitsbasierte Planungsmethode für Schraubprozesse erarbeitet und über ein spezifisches Fallbeispiel validiert. Insgesamt unterteilt sich der Aufbau der Arbeit dabei in zehn Kapitel, welche folgend im Einzelnen erläutert werden.

Für die weitere Erfassung und Typisierung praxisrelevanter Probleme sowie der Erfassung und Interpretation problemrelevanter Theorien und Hypothesen der empirischen Grundlagwissenschaft können drei Themenschwerpunkte fokussiert werden. Dafür erfolgt in Kapitel 2 zunächst eine Charakterisierung der Automobilendmontage, in Kapitel 3 eine Einführung in den Themenschwerpunkt der Wiederverwendung im Engineering und in Kapitel 4

die Erläuterung allgemeiner Planungs- und Engineeringprozesse, der Digitalen Fabrik und verschiedener Modellierungsansätze.

Auf Basis der Themenschwerpunkte Wiederverwendung im Engineering und fähigkeitsbasierte Planung von Anlagen werden jeweils Anforderungen abgeleitet und in Kapitel 5 zusammengefasst. In diesem Kapitel folgt auf Basis der Anforderungen die Untersuchung des Forschungsbedarfs ausgehend vom Stand der Technik und der Wissenschaft. Ebenso werden die einzelnen Forschungsfragen abschließend des Kapitels 5 in einen kausalen Zusammenhang strukturiert, welche in den folgenden Kapiteln anschließend sukzessiv beantwortet werden.

In Kapitel 6 wird für die Entwicklung der fähigkeitsbasierten Planungsmethode das Lösungskonzept entworfen und in das Anlagenengineering eingeordnet. Aufbauend hierauf wird in Kapitel 7 zunächst die Systematik zur Analyse und Bewertung der Wiederverwendbarkeit erarbeitet. Ausgehend dieser und der Bewertungssystematik wird in Kapitel 8 die fähigkeitsbasierte Planungsmethode für die Analyse der Wiederverwendungen erarbeitet.

In Kapitel 9 erfolgt eine erste Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten fähigkeitsbasierten Planungsmethode anhand eines Fallbeispiels. Hierbei wird eine bestehende Anlage hinsichtlich ihrer Eignung für verschiedene Schraubprozesse untersucht. Das Ziel dabei liegt in der Prüfung der erarbeiteten Modelle und Methoden. In dem letzten Kapitel erfolgt anschließend eine Zusammenfassung der Arbeit und Ergebnisse sowie eine Darstellung weiterführender, noch offener Forschungsthemen.

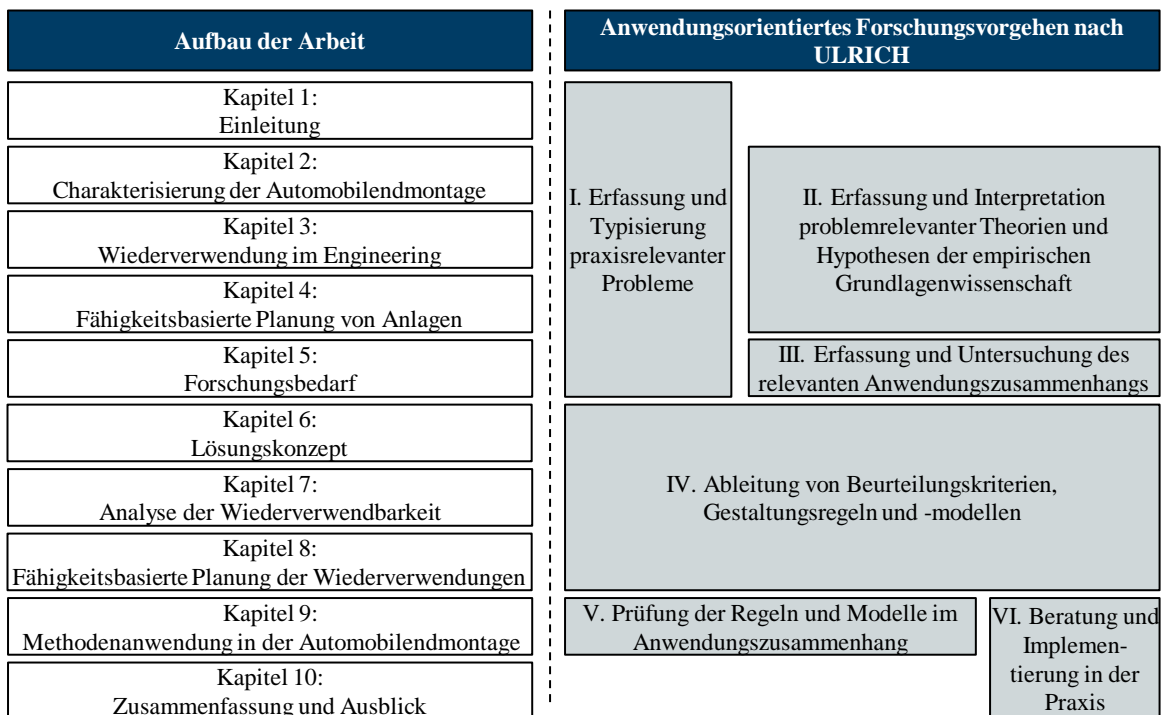


Abbildung 1: Aufbau und Einordnung der Arbeit nach Ulrich (in Anlehnung an Ulrich, Dyllick und Robst 1984)

## 2 Charakterisierung der Automobilendmontage

In diesem Kapitel erfolgt zunächst eine Darstellung des Betrachtungsrahmens der Automobilendmontage. Der Fokus der Arbeit liegt, wie in Kapitel 1.2 beschrieben, auf Schraubprozessen. Grund hierfür ist, dass diese mit einer Anzahl von ca. 2000 Stück einen für die Automobilendmontage repräsentativen Fügeprozess darstellen und somit ein hohes Potential für die Wiederverwendung von Anlagen besitzen. Im Folgenden soll zunächst in Kürze auf die Produkt- und Produktionssystemstruktur der Automobilendmontage eingegangen werden. Anschließend werden relevante Prozesse und Anlagenkomponenten bzw. Technologien mit Fokus auf der Automatisierung von Schraubprozessen vorgestellt.

### 2.1 Produktstruktur von Fahrzeugen

Zur Charakterisierung der Automobilendmontage ist zunächst die Produktstruktur eines Fahrzeuges zu betrachten. Nach (Schuh 2012) stellt die Produktstruktur eine physische Zusammensetzung des Produkts aus Einzelteilen, Komponenten und Baugruppen inklusive der Beziehungen dieser zueinander dar (Schuh 2012). Die Produktstruktur bietet somit Informationen über das Produkt und ist damit eine Grundlage für die weitere Montageplanung (Eversheim 1989). Die Produktstruktur eines Fahrzeuges lässt sich in sieben Ebenen unterteilen (siehe Abbildung 2). Auf der obersten Ebene steht das Produktportfolio, was in der Automobilindustrie der Modellpalette entspricht. Diese gliedert sich weiter in Produktsegmente bzw. Baureihen wie z. B. im Falle der Volkswagen AG in einen Golf, Passat oder auch in ein Elektrofahrzeug wie den ID.3 oder ID.4, die wiederum mehrere Modelle enthalten können. Die oberen drei Ebenen führen so bei einer großen Modellpalette und Anzahl an Baureihen zu einer hohen Varianz an unterschiedlichen Modellen. Hinzukommt, dass auf den nächsten Ebenen der Komponente, Baugruppe und des Einzelteils zusätzlich eine Varianz in der Ausstattung entsteht, hervorgerufen durch die individualisierte Anpassung der Produkte an die Kundenwünsche (Löffler 2011). Sowohl durch die Varianz der Produkte als auch der Varianz bzgl. der Ausstattung entsteht somit eine hohe Variantenvielfalt an unterschiedlichen Fahrzeugen in der Montage.

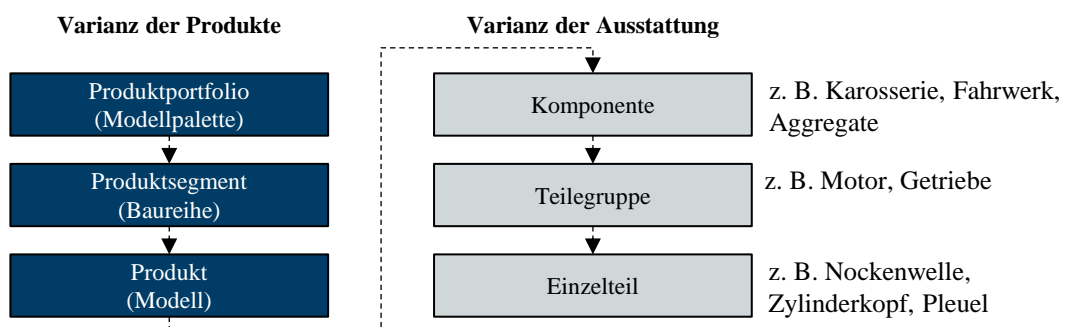


Abbildung 2: Produktstruktur eines Fahrzeuges (in Anlehnung an Löffler 2011)

## 2.2 Produktionssystemstruktur der Automobilendmontage

Referenzmodelle für eine Produktionssystemstruktur zeigen mehrere Arbeiten wie z. B. (VDI/ VDE 2015), (Waltl und Wildemann 2014) und (Kiefer 2007). Eine Kombination und Erweiterung bereits bestehender Referenzmodelle speziell für die Produktionssystemstruktur der Automobilindustrie zeigen (Hell 2018, Biffel, Lüder und Gerhard 2017), deren Eignung bereits in Arbeiten wie z. B. in der von (Roepke et al. 2016) für die Automobilendmontage überprüft wurde. Die Definition der Produktionssystemstruktur der Automobilendmontage innerhalb dieser Arbeit soll folgend ebenfalls auf Basis dieses Modells erfolgen. Das Referenzmodell von (Hell 2018, Biffel, Lüder und Gerhard 2017) stellt so eine hierarchische Produktionssystemstruktur aus funktionsorientierter Sicht mit der Zuordnung der physischen Objekte der Montagestruktur und den darin enthaltenen Anlagen dar. Ein Produktionssystem kann hierbei in die neun Ebenen Fertigungsnetzwerk, Fabrik, Fertigungslinie, Fertigungsabschnitt, Arbeitseinheit, Arbeitsstation, Funktionsgruppe, Komponente und Konstruktionselement unterteilt werden. Eine ausführliche Definition der Ebenen wird in (Biffel, Lüder und Gerhard 2017) wiedergegeben, auf welche an dieser Stelle verwiesen wird.

| Ebenen Produktionssystem |                      | Beispiel Automobilendmontage              |
|--------------------------|----------------------|---|
| 9                        | Fertigungsnetzwerk   | Automobilhersteller (OEM) und Lieferanten |
| 8                        | Fabrik               | Montage                                   |
| 7                        | Fertigungslinie      | Montagelinie                              |
| 6                        | Fertigungsabschnitt  | Montagelinienabschnitt                    |
| 5                        | Arbeitseinheit       | Dachsystem-Montage                        |
| 4                        | Arbeitsstation       | Klebestation                              |
| 3                        | Funktionsgruppe      | Roboter + Klebewerkzeug                   |
| 2                        | Komponente           | Klebewerkzeug                             |
| 1                        | Konstruktionselement | Düse des Klebewerkzeugs                   |

Abbildung 3: Hierarchische Produktionssystemstruktur am Beispiel der Automobilendmontage (in Anlehnung an Hell 2018, Biffel, Lüder und Gerhard 2017, Roepke et al. 2016)

### Struktur der Montagelinie und des Montagelinienabschnittes

Die konventionelle Automobilendmontage ist in eine Hauptlinie und mehreren Vormontagen unterteilt (siehe Abbildung 4). Innerhalb der Vormontagen werden die einzelnen Komponenten zu Baugruppen montiert, die dann anschließend in der Hauptlinie montiert werden

können. Die Hauptlinie der Automobilendmontage teilt sich wiederum in mehrere Montagelinienabschnitte auf. Jeder dieser Montagelinienabschnitte besteht aus mehreren Takten, in denen die Montageprozesse durchgeführt werden (Weidemann 2017, Küber 2017).

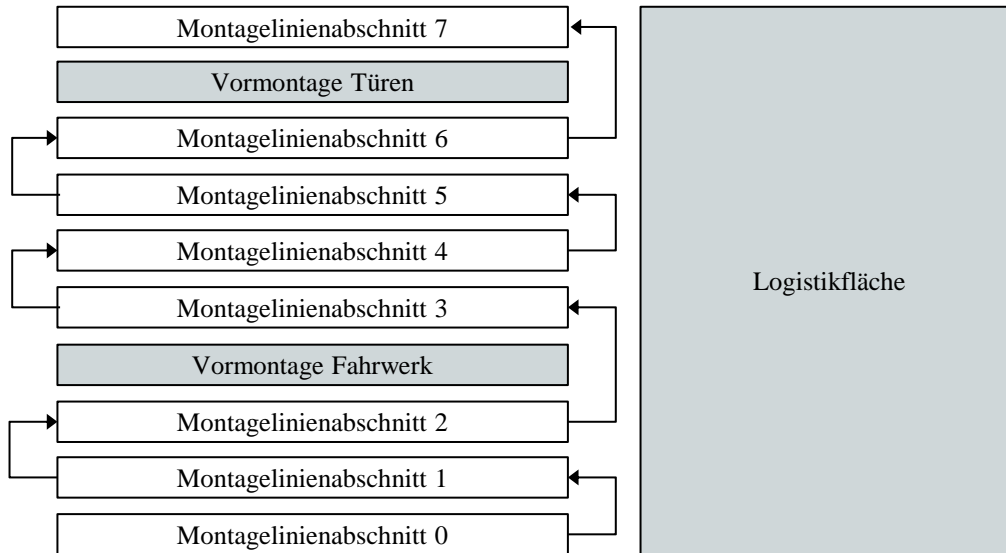


Abbildung 4: Schematisches Layout Automobilendmontage (in Anlehnung an Weidemann 2017)

Das Fahrzeug bewegt sich innerhalb der Montage mit Hilfe verschiedener Fördertechniken kontinuierlich in eine Richtung und befindet sich so während der Montage im Fließbetrieb. Die Art der Fördertechnik ist überwiegend abhängig des Montagelinienabschnittes. Eingesetzte Fördertechniken sind z. B. ein Plattenband, auch Skid genannt, oder ein Gehänge. Das Gehänge kann hierbei auf unterschiedliche Arten angetrieben werden (Werner 2009). In Ausnahmefällen existieren in der Montage Bereiche, in denen das Fahrzeug getaktet gefördert wird. Für die Kopplung von Fließ- und Taktbetrieb sind jeweils am Anfang und Ende der Montage Systeme zum schnellen Ein- und Auszug des Fahrzeuges notwendig.

Gegenüber der konventionellen Struktur werden in Forschungsprojekten wie z. B. der ARENA 2036 (siehe (Bauernhansl, Fechter und Dietz 2020)) neue Ansätze untersucht, bei denen versucht wird, die starre Verkettung der Fahrzeuge über die Fördertechnik zu umgehen. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Fokus jedoch auf den konventionellen Strukturansatz gelegt, da dieser bei den meisten Automobilherstellern Stand der Technik ist und somit zum einen die Anforderungen an die zu planenden Anlagen transparent analysiert werden können und zum anderen die Wiederverwendung stärker zum Tragen kommt.

### 2.3 Automatisierte Anlagen und Prozesse

In Anbetracht des noch geringen Automatisierungsgrades innerhalb der Automobilendmontage und der Herausforderung der hohen Produktvarianz liegt der Fokus auf der roboterbasierten Montage. Roboterbasierte Montagesysteme und deren Bestandteile werden im Folgenden auch als Anlagen und Anlagenkomponenten bzw. allgemein als Ressourcen bezeichnet. Eine Ressource ist bspw. definiert als eine Hardware- oder Softwareeinheit, die einen

Prozess bzw. eine Funktion ausführt (Pfrommer, Schleipen und Beyerer 2013). Mögliche Kategorisierungen von Ressourcen nach Funktionen sind z. B. in (VDI 2860), (Schmidt 1992) und (Scholer 2018) zu finden. In dieser Arbeit wird eine Kategorisierung in Anlehnung an (Schmidt 1992), (Loferer 2002), (Backhaus 2016) und (Scholer 2018) verwendet. Exemplarisch sind hierzu die Ressourcen einer Schraubstation in der Abbildung 5 aufgeführt. Ressourcen können so weiter in Bewegungseinrichtungen, Fügeeinheiten, Sensoren, Steuerungen, Bereitstellungssysteme und Sicherheitstechnik unterteilt werden. Verkettungsmittel und Strukturelemente aus (Loferer 2002) werden innerhalb dieser Arbeit übergeordnet der Struktur der Montagelinie zugeordnet und zählen daher nicht direkt zur Anlage.

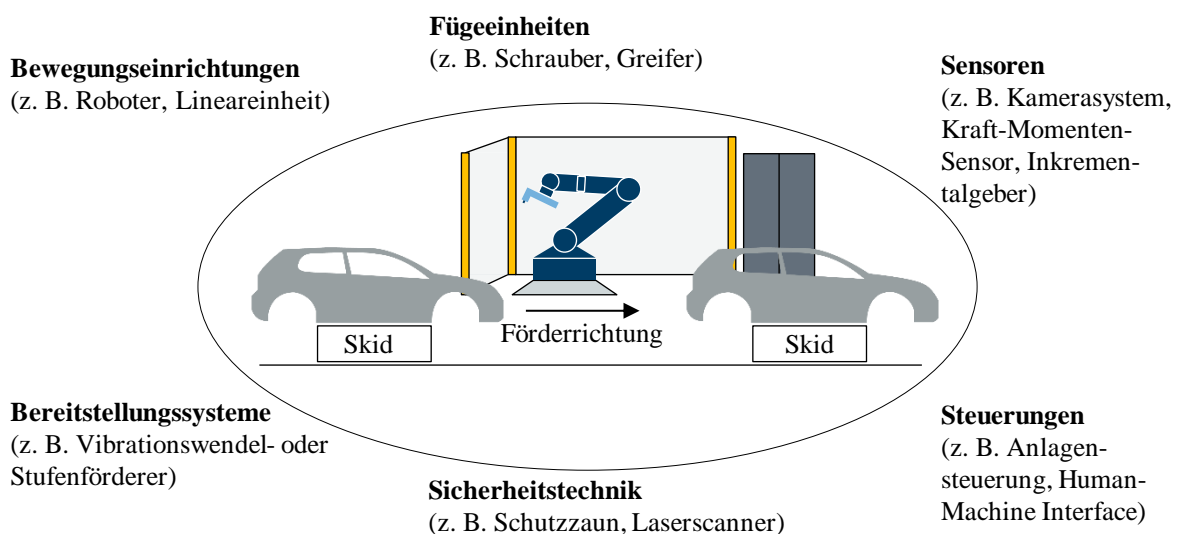


Abbildung 5: Ressourcen von Schraubstationen in der Automobilendmontage (in Anlehnung an Schmidt 1992, Scholer 2018)

Neben der Einteilung aus der Ressourcensicht kann zudem eine Einteilung aus Prozesssicht erfolgen. Die roboterbasierte Montage lässt sich aus Prozesssicht in die folgenden grundlegenden Teilschritte untergliedern (Werner 2009):

- Vorbereitende Tätigkeiten
- Positionierung/ Orientierung
- Montageprozess

Vorbereitende Tätigkeiten stellen z. B. die Aufnahme von Bauteilen und Montagehilfsmitteln durch den Roboter oder die Bereitstellung des zu montierenden Objekts in den Arbeitsraum des Roboters dar. Die Positionierung/ Orientierung des zu montierenden Objekts wird von dem Roboter durchgeführt. Eine hohe Herausforderung stellt hierbei das Montageprinzip dar. Bei der Automobilendmontage handelt es sich zumeist, mit Ausnahme der Montage des Fahrwerks, um eine Fließmontagelinie, in der sich das Fahrzeug kontinuierlich in eine Richtung bewegt. Während der manuellen Montage läuft der Werker mit dem Fahrzeug mit oder kann auf einem für den Werker ausgelegten Förderband mitfahren. Um einen Montageprozess automatisiert im Fließbetrieb ausführen zu können, ist es so notwendig, dass sich

das zu montierende Objekt bzw. der Endeffektor des Roboters mit dem Fahrzeug ebenfalls mitbewegt. Dieser Vorgang des Gleichlaufes zwischen Fahrzeug und Roboter wird auch als Synchronisation bezeichnet. Sobald der Roboter mit dem Fahrzeug synchronisiert wurde, kann anschließend der eigentliche Montageprozess stattfinden.

Anlagen innerhalb der Automobilendmontage charakterisieren sich vor allem durch ihr Synchronisierungssystem sowie der Fügeinheit, in dieser Arbeit speziell dem Schraubsystem. Folgend sollen daher die Prozesse und Systeme bzgl. der Teilschritte Positionierung/ Orientierung und Montageprozess, in dieser Arbeit auf Schraubprozesse bezogen, näher beschrieben werden.

### **2.3.1 Synchronisierungsprozesse und -systeme**

Mit Blick auf roboterbasierte Montagesysteme im Fließbetrieb stellt die Synchronisierung des Roboters mit bzw. zum Fahrzeug eine hohe Herausforderung dar. Schwierigkeiten bei der Synchronisierung sind vor allem Schwingungen von der Fördertechnik, die sich auf das Fahrzeug übertragen. Diese können sowohl von der Fördertechnik selbst z. B. durch Geschwindigkeitsschwankungen als auch fremdangeregt durch das externe Einwirken eines Mitarbeiters oder Roboters ausgelöst werden. Hinzu kommen geometrische Abweichungen bzw. Toleranzen am Fahrzeug oder des zu montierenden Objektes. Eine grundlegende technische Anforderung an die Anlage ist daher die Positioniergenauigkeit, neben der Sicherheit und dem eigentlichen Montageprozess (Werner 2009).

(Werner 2009) teilt den Synchronisierungsprozess in die drei Phasen Grobpositionierung, Annäherung und Kontakt. Diese unterscheiden sich vor allem in der notwendigen Positionierungs- und Orientierungsgenauigkeit (Werner 2009). In der Kernlinie stellt das Fahrzeug selbst den Montagehauptkörper, kurz MHK, dar. In den Vormontagen wie z. B. der Türenvormontage sind die Türen als MHK anzusehen.

Wie in der Abbildung 6 dargestellt, besteht die Hauptaufgabe in der Grobpositionierungsphase in der eindimensionalen Synchronisation der Positionen in Förderrichtung. Die dargestellten Aufgaben sind dabei sequentiell zu erfüllen. Zu Beginn wird erfasst, wann z. B. das Fahrzeug oder die Tür in den Takt bzw. der Arbeitsstation einfährt. Nach der Grobpositionierung erfolgt zum Ende die Aktivierung der Sensorik für die folgende Feinpositionierung. In der Annäherung werden dann die Positionsdifferenzen zwischen dem MHK und Roboter erfasst und ausgeglichen. Die Synchronisation erfolgt hierbei in allen sechs Freiheitsgraden und wird iterativ abhängig der Störgrößen durchgeführt. In der letzten Phase wird dann ein Kontakt zwischen den MHK und Bauteil hergestellt und der Fügeprozess durchgeführt. Die aktive Synchronisation in sechs Freiheitsgraden erfordert dabei, dass mit Hilfe geeigneter Sensorik auf den Endeffektor einwirkenden Kräfte und Momente kontinuierlich erfasst und an die Robotersteuerung für die iterative Synchronisierung übergeben werden. Positionsdifferenzen sind hierüber auszugleichen (Werner 2009).



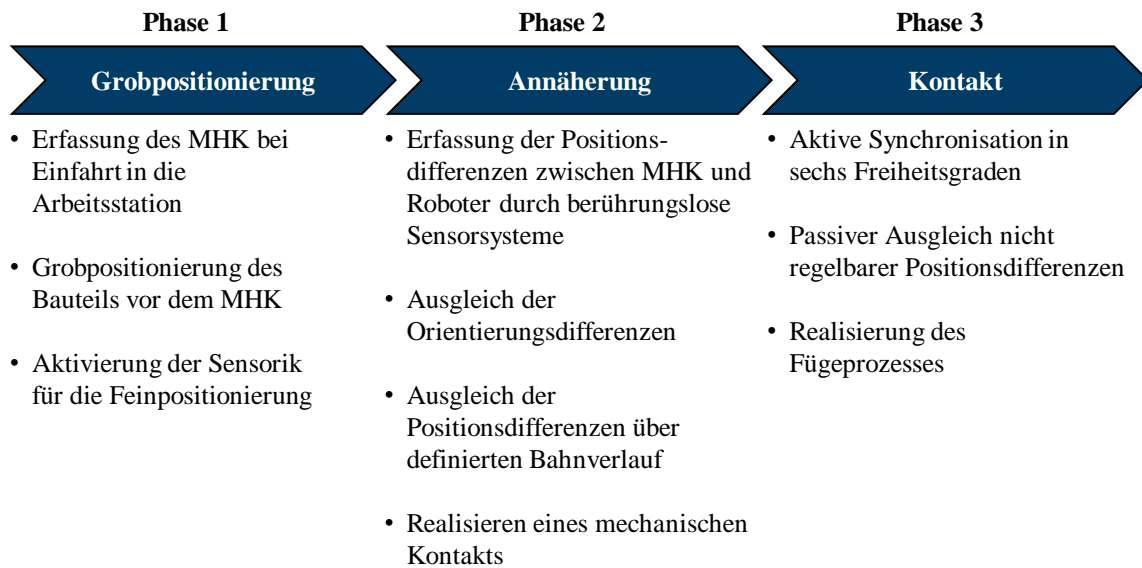


Abbildung 6: Phasen des Synchronisationslaufs (in Anlehnung an Werner 2009)

Für die Synchronisierung von Roboter und MHK existieren bereits eine Reihe von Ansätzen. Grundlegend lassen sich die verschiedenen Ansätze in die drei Synchronisierungsprinzipien mechanisch, gesteuert und geregelt unterteilen (siehe Abbildung 7). Die einfachste Form stellt die mechanische Synchronisierung dar, bei der über einen Form- oder Kraftschluss eine Verbindung zwischen dem MHK oder der Fördertechnik und der Anlage realisiert wird. Die Anlage wird folgend von dem Fahrzeug bzw. der Fördertechnik mitgeschleppt, wodurch eine quasistatische Montage erfolgen kann.

Bei der gesteuerten Synchronisation erfolgt die Vorgabe von Soll-Geschwindigkeitswerten an die Steuerung. Die Soll-Werte können sowohl aus einer Vorgabe als auch aus einer Messung der Ist-Werte der Fördertechnik stammen. Bei der festen Vorgabe von Soll-Werten können keine dynamischen Schwankungen der Fördertechnik berücksichtigt werden und nur geringe Positioniergenauigkeiten erreicht werden. Daher ist die Soll-Wertvorgabe aus Ist-Werten zu bevorzugen. Dabei wird z. B. die Fördergeschwindigkeit erfasst und der Soll-Wert für die Anlage generiert (Dirndorfer 1993).

Im Gegensatz zu der gesteuerten Synchronisation werden bei der geregelten Synchronisation die relativen Positionsdifferenzen zwischen der Anlage und dem Fördersystem bzw. MHK während der Bewegung erfasst und über einen Regelkreis an die Steuerung geleitet. Die Anlage soll so direkt auf die Ist-Werte angepasst werden. Die Regelung kann hierbei hydraulisch, pneumatisch oder elektronisch erfolgen, in dem z. B. Abweichungen der Geschwindigkeiten zu einer proportionalen Änderung der Volumenströme führen oder in dem Abweichungen von Sensoren über einen Regelkreis an die Steuerung übergeben werden (Dirndorfer 1993, Werner 2009).

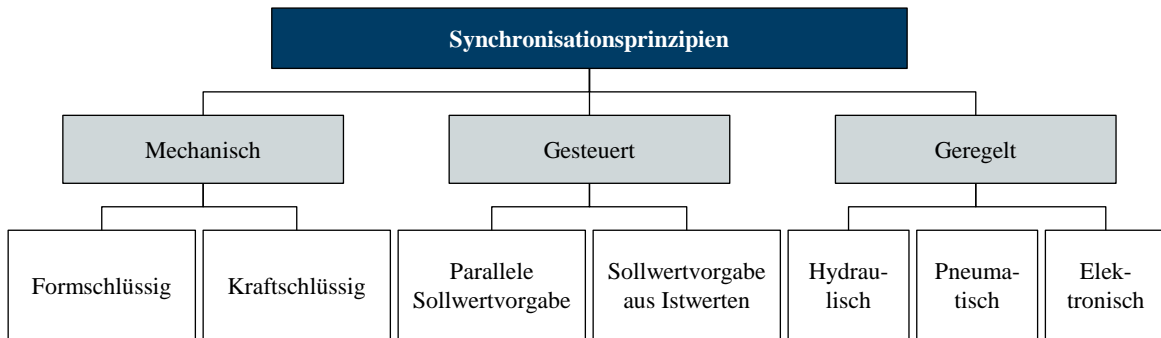


Abbildung 7: Synchronisationsprinzipien zwischen Handhabungs- und Fördersystem für die Montage im Fließbetrieb (in Anlehnung an Dirndorfer 1993)

### Beispiele von Synchronisierungssystemen

Folgend sollen exemplarisch einige Systeme bzw. Technologien für die Synchronisierung aus der Praxis vorgestellt werden. Grundsätzlich hat sich aus der Untersuchung einer Vielzahl von Anlagen gezeigt, dass der Roboter als zentraler Bestandteil der Anlage auf vier verschiedene Arten und Weisen in der Anlage für die Automobilendmontage eingebunden werden kann:

- Auf einem Manipulator
- Auf einer mobilen Plattform
- Auf einer Lineareinheit
- Stationär auf dem Boden

Ebenso hat sich gezeigt, dass häufig in den einzelnen Phasen der Synchronisierung verschiedene Prinzipien eingesetzt oder auch kombiniert werden. Exemplarisch sind hierzu in der Abbildung 8 verschiedene Beispiele aufgeführt. Das erste Beispiel, bei dem der Roboter für Verschraubungen am Fahrzeugunterboden auf einem Manipulator befestigt ist, zeigt so eine mechanisch geregelte Synchronisierung zwischen der Anlage und der Fördertechnik. In der Phase der Grobpositionierung wird die Position der Fördertechnik mit Hilfe eines Abstandssensors erfasst und der Manipulator inkl. Roboter geregelt, eindimensional in Position verfahren. In Position erfolgt anschließend eine formschlüssige, mechanische Absteckung des Manipulators am Gehänge, wodurch der Manipulator anschließend von dem Gehänge mitgeschleppt wird. Für die Annäherung kann der Roboter zusätzlich am Endeffektor mit einem Kamerasystem ausgestattet werden, mit Hilfe dessen die genaue Fügeposition ermittelt und die Position des Roboters dreidimensional geregelt werden kann (Scholer 2018).

Ein populäres Prinzip bzw. eine Technologie für die Synchronisierung in der Grobpositionierung und Annäherung stellt neben der mechanischen Synchronisierung ebenso das Conveyor Tracking dar. Hierbei wird die Position des Tool-Center-Points (TCP) des Roboters so korrigiert, dass dieser einem Objekt auf einem Fördersystem folgt (Reinhart, Werner und Lange 2009, eMove360° 2020, Werner 2009). Dieses Prinzip kann sowohl gesteuert als auch geregelt erfolgen:

- **Gesteuertes Conveyor Tracking**, z. B. über einen Inkrementalgeber oder einer anderen Sensorik wird die Geschwindigkeit der Fördertechnik ermittelt und an die Bewegungseinrichtung (z. B. Roboter oder Lineareinheit) weitergegeben. Die Bewegungseinrichtung verfolgt den MHK ausgehend der übermittelten Geschwindigkeit (Werner 2009).
- **Geregeltes Conveyor Tracking**, z. B. über ein Kamerasystem wird die aktuelle Position von Referenzpunkten/ -konturen (z. B. eine Geometrie oder auch ein QR-Code am MHK) gemessen und die Bewegungseinrichtung (z. B. Roboter oder Lineareinheit) geregelt in die Soll-Position verfahren (Reinhart, Werner und Lange 2009).

Sofern durch die Grobpositionierung eine ausreichende Genauigkeit erreicht werden kann oder Werkzeuge die noch offenen Positionsabweichungen über einen sog. Toleranzausgleich kompensieren können, müssen keine weiteren Synchronisierungsprinzipien eingesetzt werden. Eine Alternative hierzu stellt der Einsatz einer Kraft-Momenten-Sensorik dar, mit der zum Ende der Annäherung kleine Positionsabweichungen ausgeglichen werden können. Abschließend ist zu erwähnen, dass die hier aufgeführten und beschriebenen Beispiele von Synchronisierungsprinzipien nur einen exemplarischen Ausschnitt an Möglichkeiten darstellen.

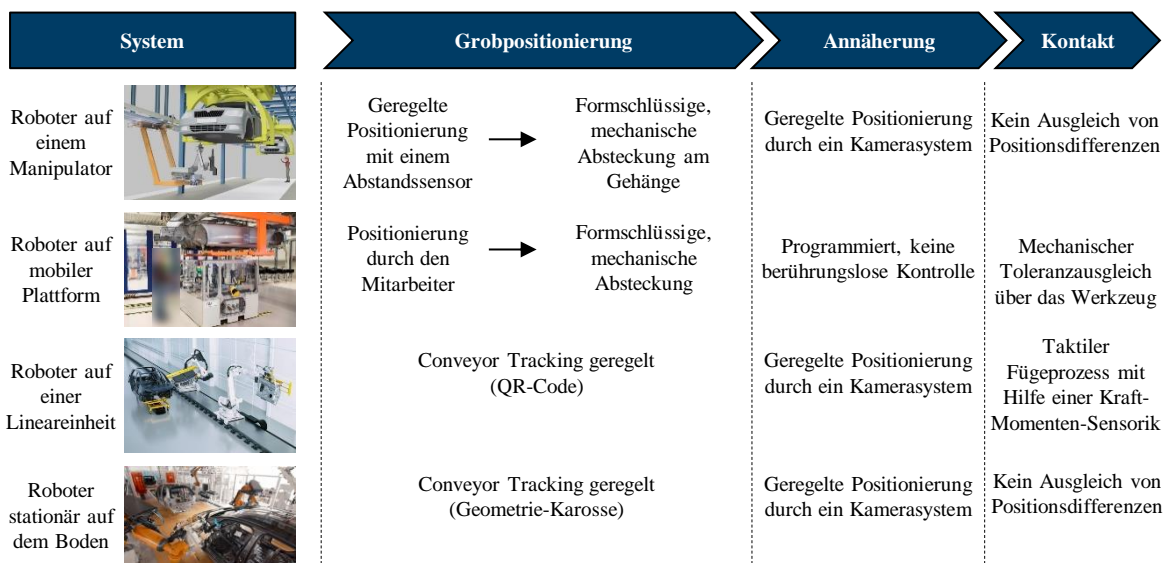


Abbildung 8: Beispiele von Synchronisierungslösungen (in Anlehnung an ZeMA 2018, Universal Robots 2018, eMove360° 2020, Fuchslocher 2021)

### 2.3.2 Schraubprozesse und -systeme

Neben der Positionierung und Orientierung soll folgend auf den eigentlichen Montageprozess Bezug genommen werden. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf Schraubprozessen, weshalb im Detail auf Schraubprozesse sowie auf Beispiele von Schraubsystemen eingegangen wird. Nach der (DIN 8593-0) fällt das Schrauben in die Untergruppe „An- und Einpressen“. Schraubverbindungen zeichnen sich durch eine lösbare Verbindung von zwei oder mehreren Bauteilen aus, die durch Schrauben oder auch Muttern verbunden werden.

Die verschiedenen Arten von Schraubverbindungen sind in der (VDI/ VDE 2251) aufgeführt. In der Automobilindustrie werden Schraubstellen/ Schraubverbindungen in Kategorien eingestuft, abhängig der Folgen bei Versagen der Schraubverbindung. Nach der jeweiligen Kategorie richtet sich die technische Mindestanforderung an die automatische Schraubstation (VDI/ VDE 2862):

- **Kategorie A** - Gefahr für Leib und Leben: Bei einer automatischen Schraubstation ist eine direkt gemessene Kontrollgröße (z. B. Drehmoment, Drehwinkel) die technische Mindestanforderung.
- **Kategorie B** - Liegenbleiber: Bei einer automatischen Schraubstation ist eine direkt oder indirekt gemessene Kontrollgröße (z. B. Drehmoment, Drehwinkel) die technische Mindestanforderung.
- **Kategorie C** - Unkritisch: Bei einer automatischen Schraubstation ist kein direktes oder indirektes messen einer Kontrollgröße notwendig.

Schraubverbindungen der Kategorie A und B werden in der Automobilendmontage häufig in zwei Teilprozesse unterteilt, da die parallele Handhabung von Bauteil und EC-Schrauber für eine ergonomische Arbeitsplatzgestaltung oder aufgrund der nur begrenzten Prozesszeiten nicht möglich ist. Bei einem getrennten Prozess werden die Schrauben bzw. Muttern mit einem undefinierten Drehmoment und zum Teil mit nur wenigen Umdrehungen manuell per Hand oder Akkuschauber eingeschraubt. Häufig kann hierdurch das Bauteil bereits grob in der Fügeposition vorfixiert werden. In einem zweiten Prozessschritt bzw. nachgelagerten Arbeitsplatz wird mit Hilfe eines EC-Schraubers die Schraube bzw. Mutter auf Drehmoment bzw. Drehwinkel verschraubt. Schraubverbindungen der Kategorie C werden hingegen häufig direkt mit Hilfe von Akkuschaubern auf Drehmoment verschraubt. Die Automatisierung der Schraubprozesse ist damit abhängig des manuellen Schraubprozesses. Wird z. B. eine Kategorie C Schraubverbindung in einem Schritt Ein- und Endverschraubt, so ist zur Einsparung manueller Fertigungszeit auch der gesamte Prozess aus Ein- und Endverschrauben zu automatisieren. Bei Kategorie A oder B Schraubverbindungen, die in der Regel in zwei Schritten verschraubt werden, ist hingegen aus Sicht der Einsparung von Montagezeiten die Option verfügbar nur den zweiten Schritt, das Endverschrauben, zu automatisieren. Ebenso können beide Prozessschritte mit einer Automatisierung für das Ein- und Endverschrauben automatisiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit und der Automatisierung von Schraubprozessen wird daher folgend zwischen den folgenden Automatisierungen differenziert:

- **Ein- und Endverschrauben:** Automatisierung des vollständigen Schraubprozesses. Das Verbindungselement wird zugeführt, eingefädelt und mit einem definierten Drehmoment/ Drehwinkel verschraubt.

- **Endverschrauben:** Bereits eingefädelt und/ oder undefiniert verschraubte Verbindungselemente werden automatisiert mit einem definierten Drehmoment/ Drehwinkel verschraubt.

### Beispiele von Schraubsystemen

In der Abbildung 9 sind unterschiedliche Schraubsysteme für die zwei Automatisierungsvarianten dargestellt. Die verwendeten Produkte dienen lediglich dem Zweck der Illustration der Möglichkeiten von Schraubsystemen. Neben diesen Produkten/ Herstellern existieren eine Reihe weiterer, auf deren Nennung an dieser Stelle verzichtet wird.

Für die Automatisierung des singulären Endverschraubens ist ein einziger Schrauber ohne eine Zuführung oder einem Magazin ausreichend. Es kann hierbei sowohl ein einzelner als auch mehrere Schrauber an einem Werkzeug (Mehrfachschräuber) verwendet werden. Mit einem einzelnen Schrauber werden die Schraubprozesse sukzessiv nacheinander durchgeführt. Hingegen einem Mehrfachschräuber, der die Schraubprozesse parallel durchführt, ist diese Lösung flexibler hinsichtlich einer möglichen Produktvarianz.

Neben dem singulären Endverschrauben ist der Schrauber ebenso für eine Automatisierung des Ein- und Endverschraubens geeignet. Die Verbindungselemente können z. B. über ein Pick & Place aufgenommen und in die Fügeposition eingefädelt und verschraubt werden. Bei einem Schrauber mit einer Zuführung wird das Verbindungselement über einen runden Schlauch oder Profilschlauch direkt zum Schrauber zugeschossen. Eine dritte Variante stellt einen Schrauber mit einem integrierten Magazin dar. Das Magazin befindet sich wie auch der Schrauber am Roboter und führt die Verbindungselemente dem Schrauber zu. In einem Bereitstellungssystem wie z. B. Vereinzelungs- und Magazinierungssystem kann nach dem Prozess das Magazin anschließend wieder bestückt werden.



Abbildung 9: Beispiele von Schraubsystemen (in Anlehnung an Weber 2018, Fiam 2019, Scholer 2018)

### 3 Wiederverwendung im Engineering

Um innerhalb dieser Arbeit die Wiederverwendbarkeit von Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien gemäß der zentralen Forschungsfrage aus Kapitel 1 analysieren zu können, soll folgend zunächst allgemein auf das Thema Wiederverwendung eingegangen werden. Zuerst soll dazu eine Definition der Begriffe Wiederverwendung und Wiederverwendbarkeit vorgestellt werden. Anschließend soll die Wiederverwendung im Engineering eingeordnet werden und eine Differenzierung zwischen verschiedenen Arten der Wiederverwendung erfolgen. Zum weiteren Verständnis werden wiederverwendungsgerechte Strukturen sowie die Störgrößen auf die Wiederverwendung beschrieben. Abschließend des Kapitels erfolgt eine Darstellung relevanter Methoden und Ansätze sowie eine Ableitung der Anforderungen an die Methode ausgehend des Themenkomplexes der Wiederverwendung.

#### 3.1 Definition Wiederverwendung & Wiederverwendbarkeit

Zur Einführung in den Themenkomplex der Wiederverwendung werden folgend die beiden relevanten Begriffe Wiederverwendung und Wiederverwendbarkeit selbst definiert.

##### Wiederverwendung

Nach der (VDI 2343) ist die Wiederverwendung als „*Verwendung eines Gerätes oder seiner Bestandteile zum gleichen Zweck, für den es entwickelt wurde*“ definiert. Die Wiederverwendung beinhaltet dabei ebenfalls eine Weiterverwendung. Eine Weiterverwendung ist eine erneute Verwendung eines Produktes für weitere Verwendungszwecke. Diese Verwendungszwecke können bereits bei der Herstellung des Produktes berücksichtigt werden und die Weiterverwendung kann sowohl ohne als auch mit Veränderung der Gestalt des Produkts erfolgen (VDI 2343). Eine weitere Definition, die auch in dieser Arbeit verwendet werden soll, zeigt die (VDI/ VDE 3695): „*Wiederverwendung zielt in die Richtung, ein Artefakt in möglichst vielen Kundenprojekten einsetzen zu können*“. Artefakte können nach der (VDI/ VDE 3695) in materielle Artefakte wie z. B. Motoren, Pumpen, Funktionsbausteine und immaterielle Artefakte wie z. B. Pläne, Architekturen und Spezifikationen unterteilt werden. Was als ein wiederverwendbares Artefakt deklariert wird ist abhängig von der Domäne und der Engineering-Organisation (VDI/ VDE 3695). Allgemein lassen sich mittels der Wiederverwendung Potentiale aus wirtschaftlicher Sicht in den Bereichen Entwicklung und Produktion realisieren, z. B. durch Skalen- oder Lernkurveneffekten (Schuh 2012).

##### Wiederverwendbarkeit

Der Begriff Wiederverwendbarkeit wird vor allem in der Softwareentwicklung häufig genutzt. Für diese Arbeit soll jedoch eine systemorientierte Definition nach (Ko, Hu und Huang 2005) aufgegriffen werden. (Ko, Hu und Huang 2005) definiert die Wiederverwendbarkeit als die Fähigkeit eines Systems, ausgehend seiner ersten Anwendung für einen Typ oder einer Generation von Produkt wiederholt für andere Typen oder Generationen verwendet werden zu können. Da die Wiederverwendbarkeit vor allem von den zukünftigen Situationen

des Produktionsumfeldes abhängt, stellt die Wiederverwendbarkeit zudem ein probabilistisches Maß dar.

Des Weiteren kann nach (Ko, Hu und Huang 2005) zwischen einer intrinsischen und effektiven Wiederverwendbarkeit unterschieden werden. Die intrinsische Wiederverwendbarkeit bezieht sich auf die allgemeinen Fähigkeiten des Systems und ist unabhängig davon, ob ein System wiederverwendet wird oder nicht. Im Gegensatz hierzu beschreibt die effektive Wiederverwendbarkeit den Grad der Effektivität der intrinsischen Fähigkeiten in Bezug auf die Montageaufgabe (Ko, Hu und Huang 2005). Für die Ermittlung der effektiven Wiederverwendbarkeit ist es so erforderlich die Eignung des Systems für die jeweilige Montageaufgabe im Detail zu untersuchen. Hingegen werden bei der intrinsischen Wiederverwendbarkeit ausschließlich allgemeine Fähigkeiten eines Systems ohne Bezug zu einer Montageaufgabe betrachtet.

### **3.2 Wiederverwendung im Engineering**

Im Folgenden soll auf die Entwicklungsprozesse eingegangen werden, die eine Wiederverwendung im Engineering berücksichtigen. Zunächst wird das Vorgehensmodell zur Wiederverwendung von Artefakten nach der (VDI/ VDE 3695) beschrieben. Neben diesem Vorgehen existieren eine Reihe weiterer Vorgehen welche in (Lüder et al. 2011) vorgestellt und zusammengefasst werden. Nach (Lüder et al. 2011) besitzen die verschiedenen Engineeringprozesse starke Ähnlichkeiten. In (Lüder et al. 2011) werden die Prozesse deshalb kombiniert und zu einem generalisierten Engineeringprozess zusammengefasst. Dieser lehnt sich an die Richtlinien der (VDI/ VDE 3695), (VDI 4499) und (VDI 2206) an und besteht aus den drei Teil-Entwicklungsprozessen für das Produkt-, Komponenten- und Lösungsgeschäft. Abhängig des betrachteten Systems können diese Teilprozesse bzw. Phasen mehr oder weniger berücksichtigt werden. Die Ergebnisse bzw. Artefakte der einzelnen Phasen können zudem, ähnlich der (VDI/ VDE 3695), in anderen Phasen wiederverwendet werden (Lüder et al. 2011). Die grundlegende Vorgehensweise der Wiederverwendung im Engineering soll folgend exemplarisch anhand der (VDI/ VDE 3695) näher beschrieben werden.

Die (VDI/ VDE 3695) bietet eine Hilfestellung für Engineering-Organisationen (EO) und dient dazu, diese zu unterstützen indem geeignete Maßnahmen zur Weiterentwicklung der EO identifiziert und ausgewählt werden. Es wird ein Vorgehensmodell beschrieben, dass die projektabhängigen Tätigkeiten für die Projektabwicklung von Anlagen und projektunabhängige Tätigkeiten für die Spezifikation von wiederverwendbaren Artefakten und Standards beschreibt. Die Abbildung 10 zeigt die Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Vorgehensmodellen. Bei den projektabhängigen Tätigkeiten wird davon ausgegangen, dass eine EO in einem oder mehreren Projekten Tätigkeiten durchführt. Die Tätigkeiten werden dabei in die Phasen Akquisition, Planung, Realisierung und Inbetriebnahme gegliedert.

Nach der (VDI/ VDE 3695) existieren eine Reihe verschiedener Zielzustände, die aufeinander aufbauen und zum Teil Zielzustände anderer Aspekte voraussetzen. Das Vorgehensmodell der projektabhängigen Tätigkeiten besitzt so die Zielzustände A bis D. Zielzustand A beschreibt, dass in der EO bereits ein geeignetes Vorgehensmodell für die Abwicklung von Projekten existiert und eingesetzt wird. Der Zielzustand B ist erreicht, wenn das Vorgehensmodell innerhalb definierter Grenzen an das jeweilige Projekt angepasst werden kann. Der Zielzustand C liegt vor, wenn das Vorgehensmodell mit der Zeit systematisch weiterentwickelt wird und der Zielzustand D umfasst eine Kombination aus Zielzustand B und C (VDI/ VDE 3695).

Die projektunabhängigen Tätigkeiten dienen der Unterstützung und effizienten Gestaltung des Projektgeschäftes. Projektunabhängige Tätigkeiten sind z. B. die Entwicklung eines durchgängigen Datenmanagements, Spezifikation einer gemeinsamen Beschreibungssprache und von projektübergreifend wiederverwendbaren Artefakten sowie der Definition von Referenzmodellen und der Entwicklung einer technologischen Anlagenstruktur. Wie auch bei den projektabhängigen Tätigkeiten können bei projektunabhängigen Tätigkeiten verschiedene Zielzustände vorliegen. Der Zielzustand A beschreibt so, dass ein Vorgehensmodell für projektunabhängige Tätigkeiten existiert und der Zielzustand B beschreibt eine Optimierung des Vorgehensmodells für projektunabhängige Tätigkeiten (VDI/ VDE 3695).

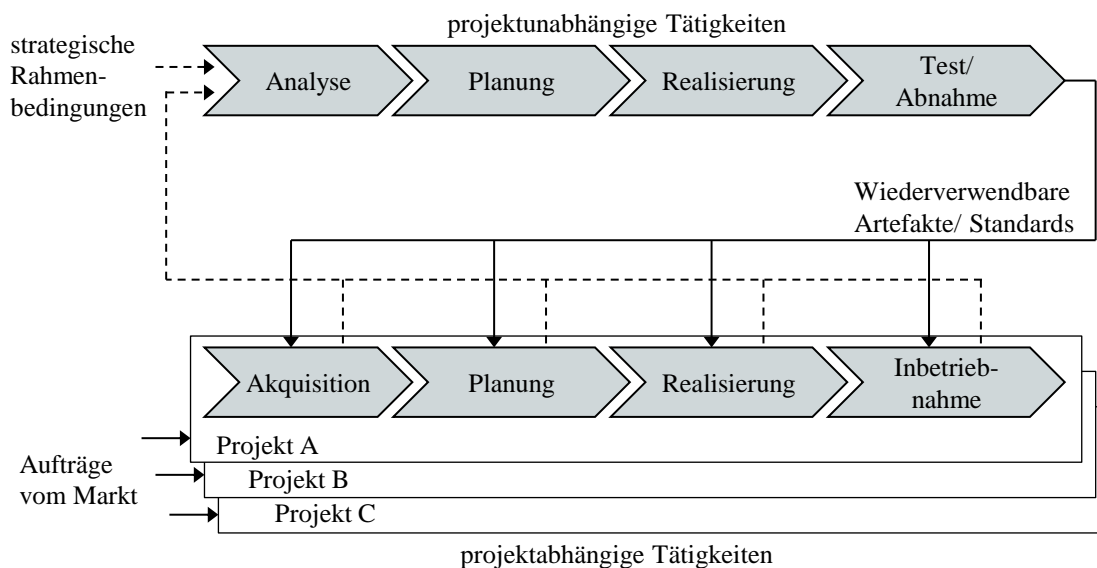


Abbildung 10: Vorgehensmodell zur Wiederverwendung von Artefakten (VDI/ VDE 3695)

Eine Methode zur Erhöhung der Effizienz des Engineeringprozesses ist die Wiederverwendung von Artefakten und Standards. Diese zielt darauf ab, ein Artefakt in möglichst vielen Projekten einzusetzen. Hierbei existieren unterschiedliche Wiederverwendungsstrategien. (Schröck 2016) unterscheidet so zwischen verschiedenen Wiederverwendungsmechanismen und ordnet diese den Zielzuständen der (VDI/ VDE 3695) sowie der Klassifizierung der



Wiederverwendung nach (Maga 2013) zu (siehe Tabelle 1). Eine Übersicht der Wiederverwendungsmechanismen wie z. B. Copy, Paste & Modify, Typ-Instanz-Konzept, Templates, Pattern oder auch Bibliotheken ist u. a. in (Röpke 2019) und (Schröck 2016) zu finden.

Eine systematische Wiederverwendung von Artefakten wird erst mit dem Zielzustand D erreicht, bei dem die Wiederverwendung auf einem Referenzmodell basiert. Anforderung an diesen Zustand ist, dass bereits die Zielzustände B und C der Wiederverwendung, der Zielzustand C der Durchgängigkeit der Werkzeugkette sowie der Zielzustand A des Vorgehensmodells für projektunabhängige Tätigkeiten vorliegen. Zielzustand C der Durchgängigkeit der Werkzeugkette beschreibt dabei die Verwaltung und den Austausch von Daten und Informationen. Dieser liegt speziell vor, wenn die Planungsdaten einer Anlage elektronisch zwischen den Werkzeugen entsprechend den Arbeitsabläufen ausgetauscht werden können. Dabei sind für alle Werkzeuge Importmechanismen vorhanden und Daten können von außen manipuliert werden. Der Zielzustand C der Durchgängigkeit der Werkzeugkette setzt jedoch wiederum weitere Zielzustände von Methoden voraus. Eine Übersicht hierzu ist in (VDI/ VDE 3695) zu finden. In (Hell 2018) werden zudem alle Zusammenhänge zwischen den Methoden der (VDI/ VDE 3695) noch einmal übersichtlich dargestellt.

Tabelle 1: Wiederverwendungsmechanismen (in Anlehnung an Schröck 2016, Röpke 2019)

| Definition nach (Maga 2013)            | Zielzustand nach der (VDI/VDE 3659) | Definition nach der (VDI/ VDE 3695)  |
|--|-------------------------------------|--|
| „Ad-hoc“ Wiederverwendung              | Zielzustand A                       | Unsystematische Wiederverwendung, die vom Mitarbeiter betrieben und auf deren Erfahrungen basiert.                             |
| Opportunistische Wiederverwendung      | Zielzustand B                       | Gesteuerte Wiederverwendung innerhalb eines Projekts.  |
| Systematische Wiederverwendung         | Zielzustand C                       | Projektübergreifende Wiederverwendung innerhalb einer Organisation, die von zentraler Stelle aus gesteuert und betrieben wird. |
| Produktlinienbasierte Wiederverwendung | Zielzustand D                       | Wiederverwendung wird anhand von Referenzmodellen betrieben und es werden wiederverwendbare Einheiten abgeleitet.              |
|  | Zielzustand E                       | Verwendete Referenzmodelle sind intern und/ oder extern standardisiert.  |

### 3.3 Arten der Wiederverwendung

Zur genaueren Charakterisierung der Wiederverwendung innerhalb dieser Arbeit sollen die Arten der Wiederverwendung folgend anhand der Art der wiederverwendbaren Artefakte definiert werden. Bezogen auf den Lebenszyklus eines Systems unterteilt nach den Phasen Engineering, Nutzung und Instandhaltung sowie End-of-Life werden in den einzelnen Phasen unterschiedliche Artefakte generiert. Diese können in anderen Projekten als auch im selben Projekt wiederverwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit und der zentralen Forschungsfrage aus Kapitel 1 liegt der Fokus vor allem auf der Phase des Engineerings. Die in

dieser Phase wiederverwendbaren Artefakte können jedoch, wie in der Abbildung 11 verdeutlicht, ebenso aus der Phase der Nutzung und Instandhaltung oder auch der Phase End-of-Life stammen. Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Wiederverwendungsmöglichkeiten wird in (Biffel, Lüder und Gerhard 2017, Röpke 2019) gezeigt. Zur detaillierten Übersicht möglicher wiederverwendbarer Artefakte soll im Folgenden auf die Wiederverwendung sowohl materieller als auch immaterieller Artefakten eingegangen werden.

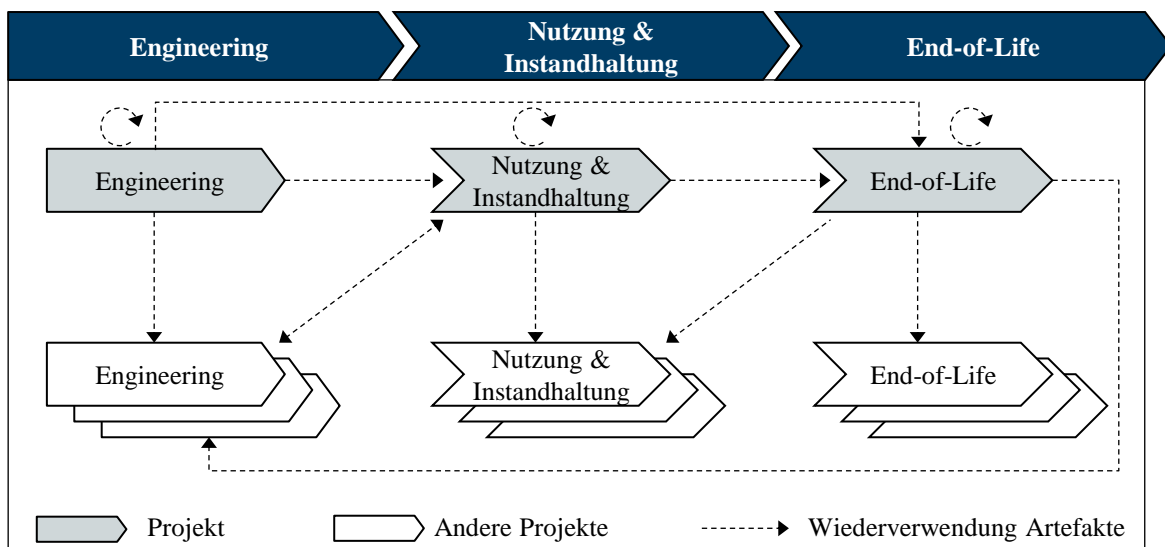


Abbildung 11: Wiederverwendung materieller und immaterieller Artefakte in den Lebensphasen (in Anlehnung an Biffel, Lüder und Gerhard 2017)

#### Wiederverwendung materieller Artefakte

Für die Wiederverwendung materieller Artefakte liegt der Fokus auf dem physischen System. In Kapitel 2.3 sind exemplarisch Anlagen bzw. Systeme dargestellt, welche ebenfalls als materielle Artefakte aufgefasst werden können. Materielle Artefakte können zudem ebenso eine unterschiedlich hohe Komplexität aufweisen. In Kapitel 2.2 wird z. B. gezeigt, dass die Produktionssystemstruktur der Automobilendmontage neun verschiedene Ebenen besitzen kann. Im Kontext der Automatisierung von Prozessen sind materielle Artefakte vor allem auf den Ebenen Konstruktionselement, Komponente, Funktionsgruppe, Arbeitsstation und Arbeitseinheit zu finden.

Innerhalb der Planung von Anlagen ist unter Berücksichtigung des steigenden Wettbewerbsdrucks (siehe Kapitel 1.1) der Grundgedanke des Value Managements (siehe (VDI 2800)) aufzugreifen. So ist ein effizienter Einsatz bzw. optimierter Nutzungsgrad der materiellen Artefakte anzustreben. In diesem Kontext ist eine Differenzierung verschiedener Arten der Wiederverwendung materieller Artefakte sinnvoll. Abhängig des zeitlichen Aspekts kann so eine Wiederverwendung materieller Artefakte in mehreren Projekten zur gleichen Zeit als auch zu unterschiedlichen Zeiten erfolgen. Die Wiederverwendung bzw. Nutzung eines Ar-

tefakts zum gleichen Zeitpunkt in verschiedenen Projekten wird folgend auch als Mehrfachverwendung bezeichnet. Eine Wiederverwendung bzw. Nutzung zu unterschiedlichen Zeitpunkten wird folgend hingegen als Weiterverwendung bezeichnet (siehe Abbildung 12):

- **Mehrfachverwendung materieller Artefakte:** Materielle Artefakte werden in mehreren Projekten zeitgleich bzw. parallel verwendet. Ein Artefakt besitzt z. B. die technischen Fähigkeiten für die verschiedenen Anforderungen der Projekte und kann für verschiedene Verwendungszwecke zeitgleich genutzt werden.
- **Weiterverwendung materieller Artefakte:** Materielle Artefakte werden nach ihrer Nutzung in einem Projekt in einem anderen Projekt verwendet. Für das neue Projekt können die materiellen Artefakte zum Teil angepasst werden.

Als Verwendungszweck kann hierbei sowohl eine Ressource als auch Prozess gemeint sein. Generell kann festgehalten werden, dass eine höhere Mehrfachverwendung zu einem effizienteren Einsatz von Ressourcen führt. Die Realisierung von Mehrfachverwendungen erfordert jedoch, dass abhängig der Fähigkeiten des materiellen Artefakts eine Bündelung geeigneter Ressourcen bzw. Prozesse durchgeführt wird. Allgemein stellt sich zudem sowohl bei der Mehrfachverwendung als auch der Weiterverwendung jeweils die Frage nach der technischen Machbarkeit, wie z. B. der Reichweite und der Auslastung eines Roboters für verschiedene Prozesse, und auf welcher Ebene des Produktionssystems eine Mehrfachverwendung sinnvoll ist.

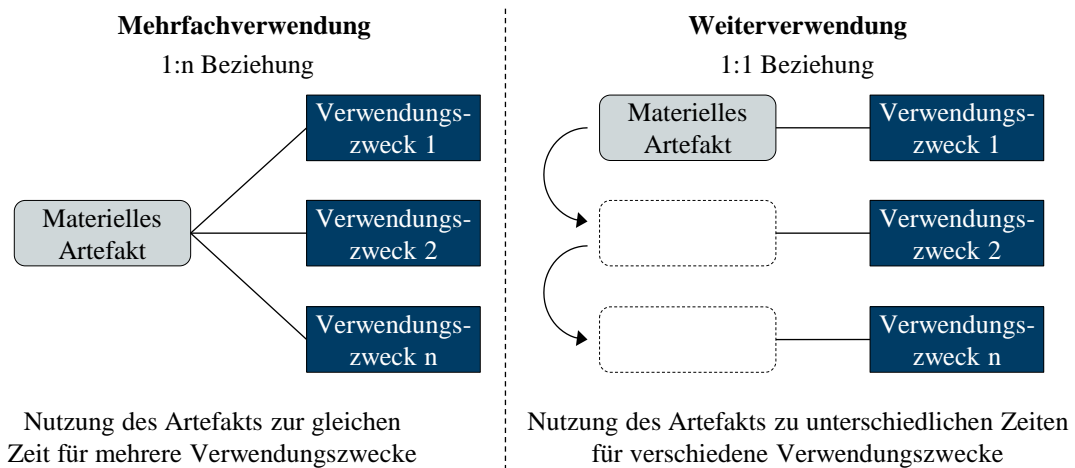


Abbildung 12: Arten der Wiederverwendung materieller Artefakte

Zur Analyse der effektiven Wiederverwendbarkeit ist es erforderlich, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, die Eignung des Systems bzw. Artefakts für die jeweilige Montageaufgabe zu untersuchen. Hierfür müssen die Anforderungen ausgehend der Montageaufgabe präzise vorliegen. Im Falle einer Weiterverwendung ist dies jedoch aufgrund des großen Planungszeitraums nicht direkt gegeben. Folgend soll daher im Rahmen dieser Arbeit weniger die Weiterverwendung sondern vielmehr eine mögliche Mehrfachverwendung materieller Artefakte untersucht werden. Für eine Weiterverwendung soll an dieser Stelle auf die Arbeit von

(Schmidt 2018) verwiesen werden, welche sich ausführlich mit der Phase des End-of-Lifes beschäftigt und mögliche Optionen aufzeigt.

#### **Wiederverwendung immaterieller Artefakte**

Für die Analyse von immateriellen Artefakten sind im Detail die Lebensphasen Engineering, Nutzung und Instandhaltung sowie der End-of-Life Phase zu betrachten. Abhängig der Lebensphase ergeben sich unterschiedliche Artefakte, die wiederverwendet werden können. In (Biffel, Lüder und Gerhard 2017) und (Hell 2018) wurden bereits wiederverwendbare Artefakte der einzelnen Lebensphasen identifiziert und in Abhängigkeit der Ebene der Produktionsstruktur dargestellt. Ein 2D-Layout kann z. B. für die Ebenen Arbeitsstation, Arbeitseinheit, Fertigungslinienabschnitt sowie Fertigungslinie wiederverwendet werden. Auf kleineren Ebenen von Systemen können vor allem Konstruktionen bzw. CAD-Daten wiederverwendet werden. Weitere Artefakte für die Phase Nutzung und Instandhaltung sowie End-of-Life werden in (Biffel, Lüder und Gerhard 2017) beschrieben. Aus der Nutzung von Systemen können für neue Projekte Daten, Informationen oder auch Wissen z. B. über Eigenschaften oder Funktionen wiederverwendet werden. Ausgehend dieser können in neuen Projekten z. B. Zeiten für die Inbetriebnahme des Systems reduziert oder die Qualität durch Anpassung des Systems verbessert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit steht vor allem die Analyse wiederverwendbarer Ressourcen im Fokus. Die hierbei identifizierten Ressourcen gilt es anschließend innerhalb der projektunabhängigen Tätigkeiten (siehe Kapitel 3.2) zu entwickeln. Bei einer hohen Anzahl von Wiederverwendungen kann es so vorkommen, dass sich hierdurch hohe Entwicklungsaufwände z. B. für Konstruktionen oder Tests generieren. Damit letztlich Vorteile aus der Wiederverwendung erschlossen werden können, sind immaterielle Artefakte idealerweise einmalig zu entwickeln und für mehrere Ressourcen zu nutzen. In der praktischen Umsetzung sind z. B. innerhalb der Tests einer Ressource alle späteren Verwendungszwecke zu berücksichtigen, um so Aufwände wie z. B. Kosten und Zeit zu sparen. Die Tests einer Ressource sind somit unter der vollständigen Berücksichtigung der späteren Verwendungszwecke zu einem Zeitpunkt durchzuführen. Eine weitere Unterteilung der Wiederverwendung von immateriellen Artefakten, wie z. B. bei materiellen Artefakten, ist nicht notwendig. Denn, es kann sowohl eine Mehrfachverwendung als auch eine Weiterverwendung durch einfache Vervielfältigung oder der zentralen Ablage des immateriellen Artefakts (z. B. in einer Verwaltungsschale, siehe Kapitel 4.3.3) erfolgen.

#### **3.4 Wiederverwendungsgerechte Strukturen**

Elementare Produktstrukturtypen die eine Wiederverwendung vereinfachen sind Module, Baureihen, Plattformen und Baukästen. Ebenso sind modulare Architekturen für eine spätere Wiederverwendung entscheidend. Folgend werden daher die unterschiedlichen Produktstrukturtypen und modularen Architekturen näher erläutert.

### 3.4.1 Produktstrukturtypen

Im Folgenden wird eine Definition der verschiedenen Produktstrukturtypen: Module, Baureihen, Plattformen und Baukästen wiedergegeben.

#### Module

Nach (Miller und Elgard 1998) versteht man unter einem Modul eine auf ein Produkt bezogene und in sich geschlossene Funktionseinheit. Eine ähnliche Definition zeigt (Feldhusen und Grote 2013) bei der ein Modul als „*eine funktional und physisch relativ unabhängige Einheit*“ definiert wird. Zudem verfügen Module über standardisierte Schnittstellen, mit Hilfe derer durch Kombination eine Zusammensetzung zu einem Produkt möglich ist. Eine vollständige funktionale und physische Unabhängigkeit, auch Modularität genannt, wird nur selten erreicht, weshalb ein Modul auch nicht zwangsläufig eine Funktion vollständig erfüllen oder eine technisch sinnvolle Einheit darstellen muss. Dies senkt lediglich den Grad der Modularität der Produktarchitektur (Feldhusen und Grote 2013). Neben der funktionalen und physischen Unabhängigkeit können Module zudem abhängig der späteren Wiederverwendung klassifiziert werden, z. B. in statische, konfigurierbare oder auch generische Module (Jazdi et al. 2010). Häufig werden auch Bausteine von Baukästen mit Modulen gleichgesetzt, jedoch besteht ein Unterschied zwischen diesen. Auf ein Produkt bezogen besitzen Module eine hohe Anzahl an Funktionalitäten, wobei Bausteine lediglich eine eingeschränkte Funktionalität besitzen (Miller und Elgard 1998).

Die Granularität der wiederverwendbaren Module ist ebenfalls ein entscheidendes Kriterium. Die Wiederverwendung von feingranularen Modulen führt zu geringeren Reduktionen im Aufwand. Hingegen ziehen zu große Module einen erheblichen Anpassungsaufwand nach sich (Schröck 2016). (Maga, Jazdi und Göhner 2011) beschreibt dies auch als Spannungsfeld zwischen der Flexibilität und der hohen Wiederverwendbarkeit von kleineren Modulen und der Effizienz und Robustheit großer Module. (Klein 2014) stellt ebenso den Zielkonflikt zwischen komplexen Modulen und deren hohen Nutzen gegenüber kleineren Modulen mit einer dafür hohen Wiederverwendbarkeit heraus. Die Wiederverwendbarkeit wird hierbei vor allem abhängig der Anzahl an Wiederverwendungen sowie der daraus resultierenden Zeitersparnis dargestellt. Bezogen auf die Zielstellung dieser Arbeit leitet sich hieraus der Bedarf der Identifikation wiederverwendbarer Module für verschiedene Ebenen von Ressourcen ab.

#### Baureihen

Eine Baureihe stellt ein technisches Gebilde wie z. B. eine Baugruppe oder ein Einzelteil dar, welches sich durch gleiche Baumuster von Anbauteilen unterschiedlicher Größen charakterisiert. Baureihen besitzen so dieselbe Funktion mit der gleichen Lösung in mehreren Größenstufen. Vorteil ist hierbei, dass die konstruktive und planerische Arbeit nur einmal geleistet werden muss. Zudem können für die Fertigung Skaleneffekte generiert werden,

wodurch die Wirtschaftlichkeit als auch Qualität gesteigert werden kann. Als Nachteilig stellt sich jedoch heraus, dass durch eine eingeschränkte Größenauswahl nicht immer optimale Betriebseigenschaften gewährleistet werden können (Feldhusen und Grote 2013, Schuh 2012).

#### **Plattformen**

Vor allem in der Automobilindustrie werden Plattformbauweisen angewendet, um variantenreiche Produkte in kurzen Zykluszeiten zu entwickeln. Hierbei werden gleiche Teile und Strukturen genutzt. Eine Produktplattform besteht aus einer ausführungsneutralen Basis mit standardisierten Elementen. Auf dieser Basis oder auch Plattform genannt können alle Varianten des Produktprogramms aufgebaut werden. In der Automobilindustrie z. B. bestehen Plattformen von Fahrzeugen vor allem aus Elementen der Bodengruppe (Feldhusen und Grote 2013).

#### **Baukasten**

Für den Begriff Baukasten existieren eine Reihe von Synonymen wie z. B. Baukastensysteme, Baukastentechnik, Baukastenprinzip, modulare Systeme oder auch modulare Bauweise. Mit Hilfe von Baukästen werden geforderte Funktionsvarianten durch Kombination festgelegter Funktionsbausteine aufgebaut. Allgemein versteht man bei einem Baukasten Baugruppen und Einzelteile, die als Funktionsbausteine mit häufig unterschiedlichen Lösungen durch Kombination verschiedene Gesamtfunktionen erfüllen. Mit mehreren Größenstufen dieser Funktionsbausteine können Baukästen auch Baureihen enthalten. Bei den Funktionsbausteinen kann dabei zwischen verschiedenen Arten wie z. B. Grund-, Hilfs-, Sonder-, Anpass- oder auch Nichtbausteinen unterschieden werden. Ebenso kann zwischen Muss- und Kann-Bausteinen unterschieden werden (Feldhusen und Grote 2013, Schuh 2012). Des Weiteren werden in der Theorie Baukästen bzw. Baukastensysteme abhängig ihrer Ausprägung und Charakteristika klassifiziert. Nach ihrer Art kann so z. B. zwischen modularen, strukturgebundenen, abstrakten, ein-/ mehrdirektionalen, voll-/ unvollständigen oder auch offenen/ geschlossenen Baukastensystemen unterschieden werden. Modulare Baukastensysteme zeichnen sich z. B. dadurch aus, dass Funktionsbausteine unabhängig ihrer Funktionen an beliebig vielen Orten im System eingesetzt werden können. Voraussetzung hierfür ist, dass die Funktionsbausteine über einheitliche Schnittstellen verfügen. Beispiele sind elektrische Steuerungen oder auch Schaltschränke (Schuh 2012).

Reine kostenorientierte Betrachtungen zeigen, dass durch Baukastensysteme Skaleneffekte im Einkauf generiert und dadurch die Herstellkosten gesenkt werden können. Die Entwicklung neuer Baukästen stellt jedoch einen hohen Aufwand dar. Zu Beginn der Entwicklung sollten daher frühzeitig die Kosten abgeschätzt werden. Es stellt sich zudem vor allem in Unternehmen mit einer hohen Variantenvielfalt nicht einfach heraus, bestehende Baukastensysteme transparent darzustellen und diese zu nutzen (Feldhusen und Grote 2013). Für die

Nutzung und Bewertung von Baukästen in einem Unternehmen mit einer hohen Variantenvielfalt werden daher methodische Werkzeuge benötigt. Diese Arbeit liefert hierzu einen Beitrag, in dem die Wiederverwendbarkeit von Anlagen analysiert wird und so potentielle Baukästen transparent dargestellt werden.

#### **3.4.2 Modulare Architekturen**

Zunächst soll der Begriff Modularität näher beschrieben werden. Als Modularität wird die Eigenschaft eines Systems bezogen auf die Struktur und Funktionalität bezeichnet (Miller und Elgard 1998). (Feldhusen und Grote 2013) definiert Modularität als eine funktionale und physische Unabhängigkeit von Komponenten einer Produktarchitektur, die die Beziehungen zwischen der Funktionsstruktur und der physischen Struktur eines Produkts darstellen. Eine funktionale und physikalische Unabhängigkeit besteht z. B. dann, wenn eine Teilfunktion einer Komponente eindeutig zugeordnet werden kann (Feldhusen und Grote 2013). Eine modulare Produktarchitektur bzw. Struktur ist eine Struktur bestehend aus in sich geschlossenen Modulen mit standardisierten Schnittstellen. Indem Module durch Module mit einer anderen Funktionalität ersetzt werden, kann so eine neue Produktvariante erstellt werden (Miller und Elgard 1998). In der Abbildung 13 ist exemplarisch eine integrale und modulare Produktarchitektur gegenübergestellt. Zu erkennen ist hierbei, dass gegenüber der modularen bei der integralen Architektur keine eindeutige Zuordnung zwischen Funktion und Komponente existiert. Abhängig des Grades der funktionalen und physischen Unabhängigkeit unterteilt (Schuh 2012) modulare Strukturen weiter in integrale, funktional-modulare und physisch-modulare Strukturen. Bei funktional-modularen Strukturen besteht eine reine funktionale Unabhängigkeit und bei physisch-modularen Strukturen eine reine physische Unabhängigkeit der Module (Schuh 2012). In diesem Kontext ist die Modularisierung selbst die Tätigkeit, innerhalb derer die Strukturierung des Produkts in Module stattfindet und die Modularität erhöht werden soll (Feldhusen und Grote 2013, Miller und Elgard 1998). Dabei sollen sowohl die Abhängigkeiten zwischen den Modulen als auch die Anzahl an Schnittstellenvarianten reduziert werden (Schuh 2005).

Eine ausführliche Beschreibung der Effekte ausgehend der Modularisierung wird in (Feldhusen und Grote 2013) und (Schuh 2012) aufgeführt. Grundlegende Treiber der Modularisierung sind zudem die Gestaltung von Varianten zur Anpassung des Produkts an Kundenwünschen, die Nutzung von Ähnlichkeiten und Wiederverwendung von Ressourcen und Standards sowie die Reduzierung der Komplexität (Miller und Elgard 1998). Nach (Gepp, Vollmar und Schaeffler 2014, VDI/ VDE 3695) sind zudem die Modularisierung und Standardisierung Voraussetzungen für eine anschließende Wiederverwendung.

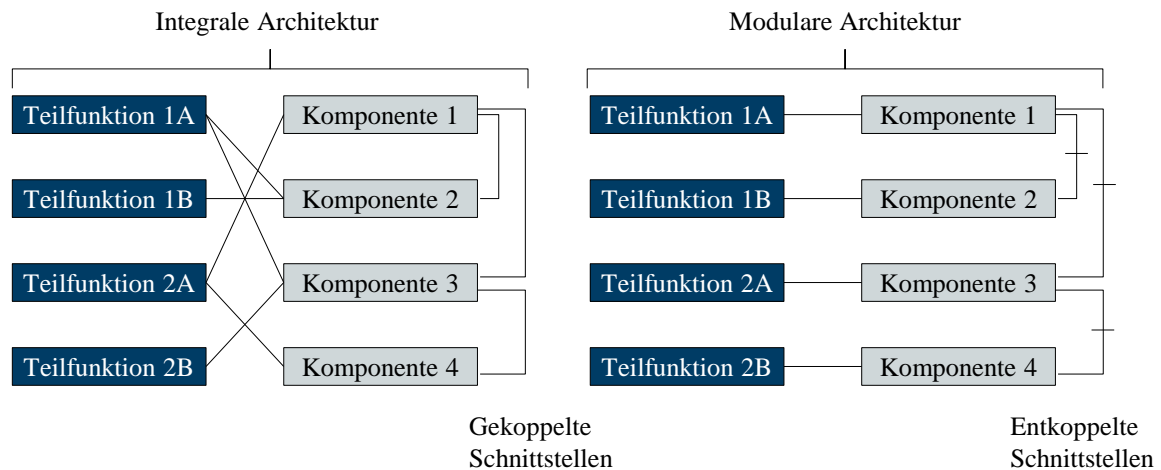


Abbildung 13: Integrale und Modulare Produktarchitekturen (in Anlehnung an Skirde 2015, Ulrich 1995)

### 3.5 Störgrößen auf die Wiederverwendung

Auf das Produktionsumfeld der Automobilendmontage können externe Störgrößen einwirken, welche zu veränderten Anforderungen an Module führen. Die Störgrößen charakterisieren sich durch eine Vielzahl sich überlagernden und gegenseitig beeinflussenden Faktoren, die sich in Korrelation verstärken und ein turbulentes Produktionsumfeld erzeugen können (Cisek, Habicht und Neise 2002). Neben den externen Faktoren kommen zudem innere Faktoren hinzu, die zusammen auf allen Ebenen des Produktionssystems zu einem Veränderungsdruck führen. Wie ein Unternehmen auf Änderungen von innen und außen reagiert, wird über eine strategische Steuerungsebene festgelegt. Abhängig dieser wirken sich Änderungen auf bestimmte Empfangseinrichtungen, auch als Rezeptoren bezeichnet, aus. Rezeptoren eines Projektes sind z. B. Produkt oder Produktvariante, Stückzahl, Zeit, Kosten, Qualität oder auch Systemelemente (Nyhuis 2008). Beispiele von Änderungen in der Automobilendmontage sind z. B.:

- Neue oder zusätzliche Fahrzeuge sowie Anpassung bestehender Fahrzeuge auf einer Montagelinie
- Anpassungen des Prozessplans und örtliche Verschiebung von automatisierten Systemen in der Montagelinie

Ausgehend der Änderungen ergeben sich auch neue Anforderungen an automatisierte Systeme in der Montage. Neue Anforderungen können so dazu führen, dass Systeme für die vorher geplanten Produkte und Prozesse nicht mehr geeignet sind. Wie in der Abbildung 14 dargestellt, sind so für die einzelnen Situationen in der Montage unterschiedliche Fähigkeiten erforderlich, welche das System bzw. Modul besitzen muss. Um auch bei neuen Anforderungen weiterhin eine Wiederverwendung vornehmen zu können, sind bestimmte Eigenschaften von Systemen bzw. Modulen erforderlich. Für die Anpassung an neue, vorher unbekannte Fähigkeiten ist so eine Wandlungsfähigkeit notwendig. Diese stellt eine höhere



Dimension der Flexibilität dar (Nyhuis 2008, Nyhuis, Wiendahl und Reichardt 2009, Wiendahl et al. 2007). Um die Fähigkeiten eines Systems an die neuen Anforderungen anzupassen, kann es vorkommen, dass Module gegen neue Module ausgetauscht werden müssen. Das System ist so für die neuen Anforderungen zu rekonfigurieren. Die Wiederverwendbarkeit von Systemen stellt aus diesem Grund ein probabilistisches Maß dar, welches von den Unsicherheiten des Produktionsumfelds abhängt (Ko, Hu und Huang 2005). Diese Unsicherheit wird folgend auch als das Risiko einer möglichen Rekonfiguration beschrieben. Die Begriffe Flexibilität, Wandlungsfähigkeit und Rekonfigurierbarkeit sollen folgend näher erläutert werden. Anschließend soll auf das Risiko der Rekonfiguration eingegangen werden.

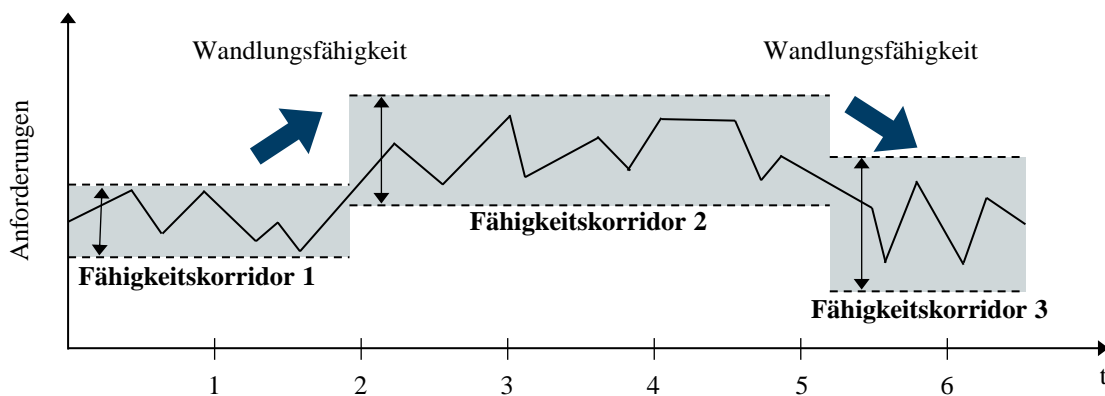


Abbildung 14: Wandlungsfähigkeit (in Anlehnung an Nyhuis 2008, Zäh, Möller und Vogl 2005)

#### 3.5.1 Eigenschaften wiederverwendbarer Module

Im Folgenden wird eine Definition der Begriffe Flexibilität, Wandlungsfähigkeit und Rekonfigurierbarkeit wiedergegeben.

##### Flexibilität

Unter der Flexibilität wird nach (Nyhuis 2008) die Fähigkeit eines Systems verstanden „sich schnell und mit nur sehr geringem finanziellen Aufwand an geänderte Einflussfaktoren anpassen“. Das System besitzt hierbei eine definierte obere und untere Grenze, die einen Fähigkeitskorridor aufspannen innerhalb dessen das System reversibel angepasst werden kann (Reinhart 2000). Bei den Grenzen handelt es sich um vorher definierte Systemzustände bzw. Merkmale, die in der Regel überdimensioniert werden (Westkämper et al. 2000, Haller 1999). Das System ist damit durch den zum Zeitpunkt der Planung festgelegten Fähigkeitskorridor begrenzt (Abele, Liebeck und Wörn 2006).

##### Wandlungsfähigkeit

Gegenüber der Flexibilität wird die Wandlungsfähigkeit als die Fähigkeit verstanden, das System auch über die vorgehaltenen Grenzen hinaus anpassen zu können. Die Korridore werden hierbei nach oben bzw. nach unten verschoben (siehe Abbildung 14), womit wandlungsfähige Systeme über keine expliziten Grenzen verfügen und als lösungsneutral angesehen werden können (Reinhart et al. 2002, Nyhuis 2008, Cisek, Habicht und Neise 2002).

Um den Fähigkeitskorridor des Systems anpassen zu können, sind sogenannte Wandlungsbefähiger notwendig. Nach (Nyhuis 2008, Wiendahl et al. 2007) sind diese als die folgenden Eigenschaften zu verstehen:

- **Universalität** beschreibt die technische Fähigkeit von z. B. Systemen unterschiedliche Produkte mit unterschiedlichen Anforderungen produzieren zu können
- **Mobilität** beschreibt die örtliche, uneingeschränkte Bewegbarkeit von Objekten bzw. Systemen
- **Skalierbarkeit** beschreibt die technische, räumliche sowie personelle Erweiter- und Reduzierbarkeit
- **Modularität** beschreibt standardisierte, funktionsfähige Einheiten oder Elemente für den modularen Austausch (siehe Kapitel 3.4.2)
- **Kompatibilität** beschreibt die Vernetzungsfähigkeit bzgl. Stoff, Energie und Medien sowie Informationen

#### **Rekonfigurierbarkeit**

Im Allgemeinen wird unter der Rekonfigurierbarkeit die Fähigkeit der Anpassung eines Systems an veränderte Bedingungen und Anforderungen durch Austauschen, Hinzufügen oder Entfernen von kleineren Teilsystemen wie z. B. Komponenten verstanden (Koren et al. 1999, Landers, Min und Koren 2001, ElMaraghy 2005, Wiendahl et al. 2007, Hees 2017). Nach (Feldhusen und Grote 2013) zählt die Rekonfigurierbarkeit so auf eine höhere Wiederverwendung ein. Das Ergebnis einer Rekonfiguration wird auch als Konfiguration eines Systems bezeichnet (Lorenzer 2011). In (ElMaraghy 2005) wird zwischen zwei Arten der Rekonfiguration unterschieden. Einer harten Rekonfiguration bei der Anpassungen an der Hardware und einer weichen Rekonfiguration bei der ausschließlich Anpassungen an der Software stattfinden.

#### **3.5.2 Risiko der Rekonfiguration von Modulen**

Die Herkunft des Begriffs Risiko ist nicht abschließend geklärt. Die Auslegung des Begriffs ist vor allem vom Kontext seiner Verwendung abhängig, weshalb keine umfassende interdisziplinäre Risikodefinition existiert. Bestehende Definitionen lassen sich jedoch nach den drei verschiedenen Auffassungen unterteilen (Kempe 2004, Schuppisser 1978):

##### 1. Informationsorientierte Risikodefinition:

Bei der informationsorientierten Risikodefinition liegt eine Unvollkommenheit des Informationszustand vor. Das Risiko wird hierbei als Zustand einer messbaren bzw. objektiven Wahrscheinlichkeit verstanden. Im Gegensatz hierzu werden nicht messbare bzw. subjektive Wahrscheinlichkeiten, die auf Expertenwissen sowie der Neigung des Entscheiders basieren, als Unsicherheit definiert (Schuppisser 1978). Subjektive Wahrscheinlichkeiten werden in der betriebswirtschaftlichen Praxis jedoch auch entgegen der Klassifizierung zum Risikobegriff gezählt (Brünger 2011), da eine

eindeutige Trennung objektiver und subjektiver Wahrscheinlichkeit in der Praxis nicht immer gegeben ist (Kupsch 1973).

#### 2. Entscheidungsorientierte Risikodefinition:

Nach der entscheidungsorientierten Risikodefinition wird das Risiko als die Möglichkeit des Eintretens einer Fehlentscheidung aufgefasst (Philipp 1967). Die Höhe des Risikos korreliert zudem mit der Korrigierbarkeit der Fehlentscheidung. Durch Fehlentscheidung hervorgerufene irreversible Kosten steigen mit der Zeit in der diese nicht korrigiert werden, womit das Risiko ebenfalls auch einen zeitlichen Anteil besitzt (Kupsch 1973).

Im unternehmerischen Umfeld resultieren die Risiken aus der mangelnden Beherrschbarkeit zukünftiger Ereignisse bzw. Szenarien. Aufgrund eines unvollkommenen Informationszustands können nicht alle Szenarien in der Planung berücksichtigt werden (Lange und Wall 2001, Fiege 2006, Röpke 2019).

#### 3. Zielorientierte Risikodefinition:

In der zielorientierten Risikodefinition wird die Möglichkeit eines Verlustes, einer Abweichung von Plandaten oder allgemein einer Zielabweichung als Risiko verstanden (Brünger 2011, Kupsch 1973). Das Risiko bezieht sich hierbei auf die reine Möglichkeit einer Abweichung vom Ziel und nicht auf die tatsächliche Abweichung selbst (Brühwiler 1979).

### **Risiko bezogen auf die Wiederverwendung von Modulen**

Angelehnt an (Brünger 2011) sind die wesentlichen Punkte der informations-, entscheidungs- und zielorientierten Risikodefinition die Möglichkeit von Zielabweichungen, die Gefahr von Fehlentscheidungen sowie das Vorliegen von Wahrscheinlichkeiten. Ausgehend dieser Punkte soll folgend eine Definition des Risikos bezogen auf die Rekonfiguration von Systemen in der Automobilendmontage erfolgen.

Wie in Kapitel 1 beschrieben besteht das Ziel dieser Arbeit in der Analyse der Wiederverwendbarkeit von Systemen. In Kapitel 3.1 wurde bereits eine Definition der Wiederverwendbarkeit für diese Arbeit dargelegt. Diese ist die Fähigkeit eines Systems ausgehend seiner ersten Anwendung für weitere, zukünftige Anwendungen verwendet werden zu können. Die Wiederverwendbarkeit ist zudem stark von der Situation des Produktionsumfeldes abhängig. Aufgrund des turbulenten Umfelds der Automobilendmontage sowie den kurzen Produktlebenszyklen (Bögemann 2018) handelt es sich hinsichtlich der zukünftigen Situation der Montage häufig um einen unvollkommenen Informationszustand, womit sich eine Gefahr der Fehlentscheidung vor allem in der Analyse der Wiederverwendbarkeit von Systemen einstellt. Im Detail bedeutet dies, dass die Fähigkeit von dem betrachteten System für die zukünftigen Anforderungen des Produktionsumfeldes nicht ausreicht.

Neue oder zusätzliche Fahrzeuge auf der Montagelinie sowie Änderungen im Prozessplan und damit eine örtliche Verschiebung von Systemen in der Montagelinie führen häufig zu neuen Anforderungen an Systeme. In der frühen Phase der Entwicklung automatisierter Systeme liegen Informationen hinsichtlich der neuen Anforderung zumeist nicht vor. Bei der Entwicklung neuer Fahrzeuge handelt es sich zudem um einen evolutionären Prozess, bei dem z. B. immer intelligentere Produkt- und Fertigungskonzepte erarbeitet werden (Schömann 2012, Bauernhansl, Fechter und Dietz 2020). Eine objektive Analyse der Wahrscheinlichkeit von Anforderungen ausgehend bisheriger Situationen der Montage ist somit nicht zielführend. Viel mehr sind subjektive Schätzungen von Experten der verschiedenen Disziplinen aus Entwicklung und Produktion erforderlich, um die Wahrscheinlichkeit zu bestimmen.

Eine Zielabweichung im Kontext der Wiederverwendbarkeit bedeutet, dass das System für zukünftige Anforderungen nicht geeignet ist. Folgend können hohe zeitliche und kostentechnische Aufwände für die Rekonfiguration des Systems notwendig werden. Die Wiederverwendbarkeit des Systems stellt sich so unter einer ganzheitlichen Berücksichtigung zukünftiger Situationen der Montage als geringer heraus, wodurch sich ggf. alternative Systeme für eine mögliche Standardisierung und Wiederverwendung als geeigneter herausstellen.

Bezogen auf diese Arbeit soll folgend das Risiko in Anlehnung an (Brühwiler 2001) definiert werden als die spezifische Bedrohung eines Systems bzw. einer Ressource, welche nach ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit und dem Schadensausmaß bewertet werden kann. Im Hinblick auf die Wiederverwendung bezieht sich die Eintrittswahrscheinlichkeit dabei auf die zukünftigen Situationen des Produktionsumfeldes und den daraus resultierenden neuen Anforderungen an das System. Das Schadensausmaß stellt dementsprechend den Rekonfigurationsaufwand dar, um das System weiterhin wiederverwenden zu können.

### **3.6 Relevante Methoden der Risikobeurteilung**

Der Prozess der Risikobeurteilung unterteilt sich in die einzelnen Schritte Risikoidentifizierung, Risikoanalyse und Risikobewertung (DIN ISO 31000). Angesichts der Unsicherheit zukünftiger Entwicklungen besitzen Prognoseverfahren eine besondere Bedeutung innerhalb dieser Schritte. Dabei kann zwischen intuitiven bzw. qualitativen und analytischen bzw. quantitativen Verfahren differenziert werden. Qualitative Methoden beruhen auf subjektiven Einschätzungen über zukünftige Ereignisse. Hingegen bedienen sich quantitative Methoden mathematisch-statischer Modelle. Es werden so z. B. Daten und Ergebnisse der Vergangenheit über den beobachteten Zeitraum hinaus extrapoliert (Götze, Henselmann und Mikus 2013). Im Kontext der Zielstellung dieser Arbeit sind Prognosen über zukünftige Entwicklungen von Fahrzeugen notwendig. Hierbei handelt es sich um einen evolutionären Vorgang, weshalb Daten und Zustände vergangener Fahrzeuge für Prognosen nicht geeignet sind, viel mehr sind so subjektive Einschätzungen bzgl. zukünftiger Entwicklungen zu verwenden.

Innerhalb der Risikoidentifikation sind die Risiken zu finden und zu beschreiben (DIN ISO 31000). Dabei kann zwischen einer Bottom-up-Strategie bzw. Top-down-Strategie unterschieden werden. Bei einer Bottom-up-Strategie beginnt man mit der Analyse der kleinsten Elemente des Systems. Über eine Verkettung dieser mit den höheren Ebenen können anschließend Risiken der nächsthöheren Einheiten erfasst werden. Hingegen wird bei der Top-down-Strategie zunächst das Risiko des Gesamtsystems bzw. Gesamtprojekts identifiziert. Anschließend wird Stufenweise das Risiko der kleineren Einheiten und Elemente untersucht (Gutmannsthal-Krizanits 2013). Des Weiteren können Methoden zur Risikoidentifizierung in analytisch strukturierte bzw. systematische und kreativ-intuitive bzw. unsystematische Methoden differenziert werden (Voigt 2010). Systematische Methoden geben bereits einen vordefinierten Lösungsweg vor, hingegen besteht bei unsystematischen Methoden mehr Freiraum für die Subjektivität und Kreativität der Mitarbeiter. Eine ganzheitliche Risikoidentifikation setzt jedoch stets ein interdisziplinäres Team voraus (Werdich 2012, Wolke 2015). Verschiedene Methoden zur Risikoidentifizierung zeigen (Voigt 2010, VDA 4-2, Romeike 2003, Alfen et al. 2010, Huth und Romeike 2016, Königs 2013). In (Röpke 2019) werden diese abhängig ihrer Systematik übersichtlich dargestellt (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Methoden zur Risikoidentifizierung (Röpke 2019)

| Basismethoden  | Unsystematische Risikoerfassung  | Systematische Risikoerfassung  |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Befragung von fachkundigen Mitarbeitern/ Experten</li> <li>• Besichtigungsanalyse</li> <li>• Dokumentationsanalyse</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Brainstorming</li> <li>• Brainwriting</li> <li>• Delphi-Methode</li> <li>• Interviews</li> <li>• Mind-Mapping</li> <li>• Morphologischer Kasten</li> <li>• Pondering</li> <li>• SWAT-Analyse</li> <li>• Synektik</li> <li>• Bedienungsfehleranalyse</li> <li>• KJ-Methode</li> <li>• System Dynamics</li> <li>• Business Wargramming</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Checklisten/ Fragebögen</li> <li>• Ereignisbaum</li> <li>• Fehlerbaumanalyse</li> <li>• FMEA</li> <li>• Frühwarnsystem</li> <li>• Netzplantechnik</li> <li>• Organisationsanalyse</li> <li>• Simulationen</li> <li>• Szenario-Technik</li> <li>• Ursachen-Wirkungs-Diagramm</li> <li>• Workshops („Risk Assessment“)</li> </ul> |

Mit der Risikoanalyse sind die Art des Risikos sowie dessen Eigenschaften zu untersuchen. Hierbei liegt die Betrachtung vor allem auf Unsicherheiten, Risikoursachen, Auswirkungen, Wahrscheinlichkeiten, Ereignissen, Szenarien, Steuerungen und deren Wirksamkeit (DIN ISO 31000). Häufig reicht für eine Identifikation und Analyse möglicher Risiken die Anwendung einer Methode nicht aus und es sind Kombinationen verschiedener Methoden und Instrumente notwendig, z. B. kann für eine Identifikation und Analyse von Interpeden-

zen zwischen Risikoursachen eine Faktorenanalyse oder für die Bildung von Gruppen risikoauslösender Faktoren eine Cluster- oder Diskriminanzanalyse verwendet werden (Götze, Henselmann und Mikus 2013).

Die Risikobewertung vergleicht die Ergebnisse der Risikoanalyse mit den definierten Risikokriterien, um zu ermitteln, welche Handlungen erforderlich sind (DIN ISO 31000). Mögliche Risikobehandlungen sind nach der (DIN ISO 31000) u.a.:

- Beseitigen der Risikoursache
- Verändern der Wahrscheinlichkeit
- Verändern der Auswirkungen
- Beibehalten des Risikos ausgehend einer fundierten Entscheidung

Für den konkreten Fall dieser Arbeit ist, wie in Kapitel 3.5.2 beschrieben, keine quantifizierbare Aussage über die Wahrscheinlichkeit und das Schadenspotential möglich, womit ausschließlich qualitative Methoden in Frage kommen. Diese verwenden eine Klassifikation der Risiken nach Nominal- oder Ordinalskalen (Voigt 2010). Außerdem stützen sich qualitative Methoden auf subjektive und intuitive Informationen (Romeike 2004, Voigt 2010). Die genaue Auswahl der Bewertungsmethode ist dabei von der Genauigkeit der Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Risiken abhängig (Voigt 2010). Innerhalb der Risikobewertung ist ebenfalls die Risikoaggregation zu berücksichtigen. Innerhalb dieser wird das Gesamtrisiko ausgehend der identifizierten und bewerteten Einzelrisiken ermittelt. Dazu werden kompensatorische bzw. kumulative Effekte der Einzelrisiken auf das Gesamtrisiko betrachtet (Voigt 2010).

Eine häufig verwendete Methode für die Risikobewertung im Automobilbau ist z. B. die Risk-Map nach der (VDA 4-2), in der das Schadensausmaß und die Eintrittswahrscheinlichkeit graphisch dargestellt werden. Weitere Methoden für die Risikobewertung zeigen u.a. (Voigt 2010, Königs 2013, Alfen et al. 2010, VDA 4-2). Eine übersichtliche Darstellung dieser ist in (Röpke 2019) zu finden.

### **3.7 Relevante Ansätze im Themenkomplex Wiederverwendung**

In diesem Kapitel sollen folgend relevante Ansätze aus der Forschung aufgeführt und beschrieben werden. Abgeleitet aus der Zielsetzung aus Kapitel 1.2 können die zwei Forschungsbereiche der systematischen Wiederverwendung sowie der Analyse und Bewertung der Wiederverwendung bzw. Wiederverwendbarkeit von Artefakten adressiert werden. Relevante Ansätze aus der Forschung sollen im Folgenden beschrieben werden. In der Abbildung 15 werden die Ansätze anschließend noch einmal nach ihrem Schwerpunkt eingeordnet.

#### **Ansätze der systematischen Wiederverwendung von Artefakten**

Eine Vorgehensweise zur systematischen Wiederverwendung zeigt die (VDI/ VDE 3695), welche bereits in Kapitel 3.2 beschrieben wurde. Diese Vorgehensweise wird innerhalb

mehrerer Ansätze wieder aufgegriffen. So erweitert (Jazdi et al. 2010) diese zur Steigerung der Wiederverwendung und der Effizienz im Anlagenbau und industriellen Lösungsgeschäft. Dazu unterscheidet er zwischen dem Domain Engineering (projektunabhängigen Tätigkeiten) und dem Application Engineering (projektabhängige Tätigkeiten). Für die Effizienzsteigerung beschreibt er zudem einen Prozess zur systematischen Erstellung von wiederverwendbaren Artefakten innerhalb des Domain Engineerings, wobei die entstehenden Artefakte in einer Bibliothek anschließend gespeichert werden (Jazdi et al. 2010). Der Ansatz von (Jazdi et al. 2010) wird von mehreren Autoren aufgegriffen wie z. B. von (Vogel-Heuser et al. 2015) und (Hell 2018). In (Vogel-Heuser et al. 2015) wird für die projektunabhängigen Tätigkeiten ein interdisziplinärer Produktlinienansatz entwickelt, der eine effiziente Variantenverwaltung und systematische Wiederverwendung unterstützen soll. (Hell 2018) spezifiziert die Vorgehensweise der (VDI/ VDE 3695) und erweitert diese für die projektübergreifende Wiederverwendung von Entwurfsartefakten im Karosseriebauanlagendesign. Mit der Wiederverwendung im Engineering, unabhängig der (VDI/ VDE 3695), beschäftigen sich ebenfalls die Arbeiten von (Schröck 2016), (Klein 2014), (Mahler 2014) und (Thramboulidis 2008). Für eine ausführliche Analyse bestehender Forschungsansätze bzgl. der Vorgehensweise der Wiederverwendung soll an dieser Stelle vor allem auf die Arbeit von (Schröck 2016) verwiesen werden.

#### **Ansätze der Analyse und Bewertung der Wiederverwendung von Artefakten**

In Kapitel 3.5 hat sich gezeigt, dass die Eignung von Modulen zur Wiederverwendung bzw. deren Wiederverwendbarkeit von verschiedenen Eigenschaften abhängt. Folgend sollen daher Ansätze untersucht werden, die allgemein die Performance, Rekonfigurierbarkeit, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Modulen analysieren und/ oder bewerten (siehe Kapitel 3.5.1). Ebenso hat sich gezeigt, dass die Wiederverwendbarkeit ein probabilistisches Maß darstellt, welches von den Wandlungstreibern beeinflusst wird. In diesem Kontext sollen daher ebenfalls Ansätze untersucht werden, die Risiken bei der Wiederverwendung von Modulen analysieren und bewerten.

Die Arbeit von (Koren, Hu und Weber 1988) zielt darauf ab allgemein die Performance von Systemen zu bewerten. In dieser wird so z. B. eine Systemkonfiguration hinsichtlich der Kriterien Zuverlässigkeit, Produktivität, Qualität, Kapazitätsskalierbarkeit und Kosten bewertet. In der Arbeit von (Rudtsch 2016) liegt der Fokus auf der Bewertung von Produktionssystemen in der frühen Entwicklungsphase. Ansätze die auf die Bewertung und Optimierung von mechatronischen Objekten abzielen sind z. B. (Köhlein et al. 2012) und (Stallinger et al. 2011). In (Stallinger et al. 2011) wird so ein ausführlicher Kriterienkatalog mit Hauptkriterien, Unterkriterien und Eigenschaften vorgestellt. Als ein Hauptkriterium wird ebenfalls die Wiederverwendbarkeit beschrieben und weiter in Unterkriterien detailliert.

Arbeiten die auf eine Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Systemen abzielen werden u. a. von (Bauernhansl, Fechter und Dietz 2020) und (Abele, Albrecht und Faatz 2012) vorgestellt. In diesen werden vor allem die Wandlungsbefähiger bewertet. (Bauernhansl, Fechter und Dietz 2020) nutzt hierfür z. B. einen Score basierten Ansatz mit einem Fragebogen. Das Ergebnis der Ausprägung eines jeden Wandlungsbefähigers wird abschließend in einem Spinnennetzdiagramm dargestellt. (Zwißler und Gebhardt 2013) zeigt hingegen einen eher kostenorientierten Ansatz zur Bewertung von Alternativen in denen von den Wandlungstreibern abhängige Unsicherheiten zukünftiger Szenarien mit berücksichtigt werden.

Mit der Bewertung von Rekonfigurationen bzw. der Rekonfigurierbarkeit von Systemen beschäftigen sich eine Reihe von Arbeiten. (Youssef und ElMaraghy 2006) führt z. B. den Begriff „reconfiguration smoothness“ als Bewertungsindex ein, der sich aus dem gewichteten Verhältnis der zu rekonfigurierenden Komponenten und der Gesamtanzahl an Komponenten ergibt. Außerdem wird der Fall betrachtet, dass mehr als ein Szenario in Zukunft möglich ist, womit eine stochastische Bewertung notwendig wird. Den Index „reconfiguration smoothness“ greift (Hees 2017) in seiner Arbeit wieder auf und stellt die Rekonfigurationsaufwände von Produktionssystemen mit Hilfe einer Matrix gegenüber. Weitere Arbeiten wie von (Zäh et al. 2011), (Abdi 2005) und (Maler-Speredelozzi, Koren und Hu 2003) verwenden unterschiedliche Konzepte zur Bewertung. (Zäh et al. 2011) stellt ein fünfstufiges Bewertungsvorgehen vor, bei dem die Beziehungen zwischen den Komponenten eines Montagesystems zueinander modelliert und Einflussfaktoren den Komponenten zugeordnet werden. Ausgehend der Rekonfiguration soll so mit Hilfe einer Baumstruktur aufgezeigt werden, welche Komponenten betroffen sind. Die Bewertung der Rekonfigurierbarkeit erfolgt abschließend auf Basis strukturabhängiger und wirtschaftlicher KPIs (Key Performance Indicators). Einen weiteren Ansatz zeigt (Trierweiler und Bauernhansl 2022), der den Prozess der Rekonfiguration von Produktionssystemen forciert und sowohl technische als auch organisatorische Aspekte berücksichtigt. Die Rekonfiguration richtet sich hierbei an verschiedene Eigenschaften wie die Fähigkeiten, der Sequenz und der Kapazität des Produktionssystems. KPIs die hierbei erwähnt werden sind u. a. Zeit, Qualität, Variabilität und Kosten.

Das Thema Risiko in Form der Berücksichtigung von Eintrittserwartungen zukünftiger Szenarien sowie der Berücksichtigung dieser innerhalb der Bewertung der Rekonfigurierbarkeit erfolgt bereits in den Arbeiten von (Youssef und ElMaraghy 2006), (Zwißler und Gebhardt 2013) oder auch (Ko, Hu und Huang 2005). Im Detail setzt sich (Röpke 2019) mit der Risikobeurteilung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering auseinander.

Für die Bewertung der Wiederverwendbarkeit existieren vor allem in dem Bereich der Softwareentwicklung eine Reihe von Arbeiten, siehe (Luer 2007) oder auch (Singh und Tomar



2014). Im Bereich des Anlagenentwurfs für den allgemeinen Anlagenbau, der Automobilindustrie oder auch Prozessindustrie zeigen die Arbeiten von (Schröck 2016), (Hell 2018), (Klein 2014) und auch (Ko, Hu und Huang 2005) Ansätze zur Bewertung der Eignung von Modulen zur Wiederverwendung. Die Arbeit von (Ko, Hu und Huang 2005) ist an dieser Stelle hervorzuheben. In dieser wird die Wiederverwendbarkeit von Modulen analysiert indem die Fähigkeiten des Produktionssystems mit den geforderten Aufgaben verglichen werden. Abhängig der Konfiguration des Produktionssystems besitzen diese eine mehr oder weniger große Flexibilität für einen bestimmten Zeitpunkt. Die Wahrscheinlichkeit von Produkt- und Prozessänderungen wird zudem ebenfalls berücksichtigt, womit die Wiederverwendbarkeit als ein probabilistisches Maß ausgedrückt wird.

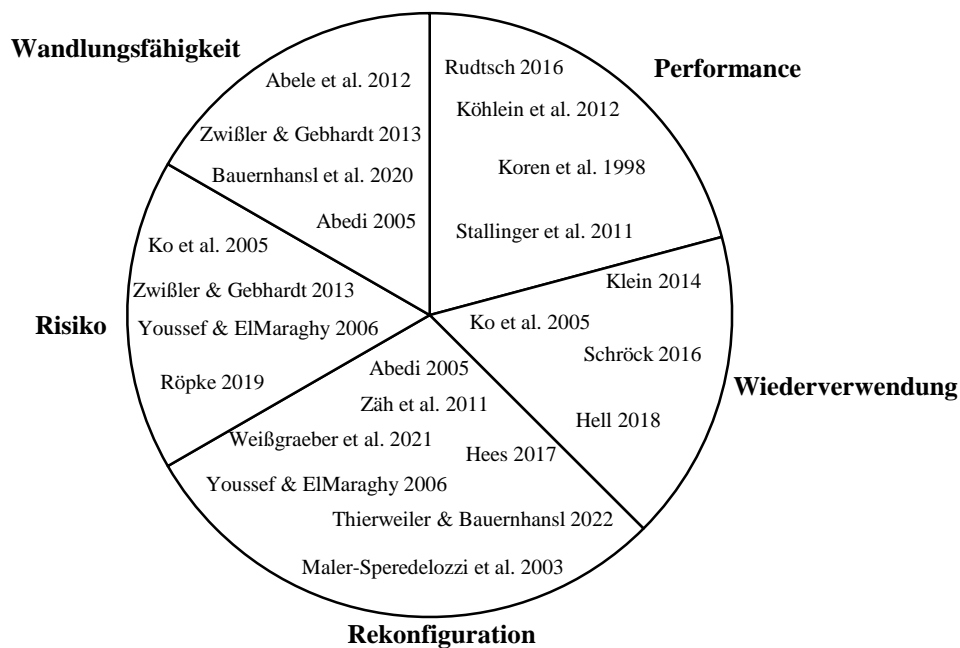


Abbildung 15: Ansätze zur Analyse/ Bewertung der Wiederverwendung von Modulen

### 3.8 Anforderungen an die Methode aus der Wiederverwendung

In diesem Kapitel sollen folgend die Anforderungen ausgehend der Wiederverwendung im Engineering zusammengefasst werden. Hierzu sind die Anforderungen im Engineering, angelehnt an die (VDI/ VDE 3695), sowie der Phase Nutzung und Instandhaltung dargestellt. Die Phase End-of-Life wird wie in Kapitel 3.3 beschrieben nicht betrachtet.

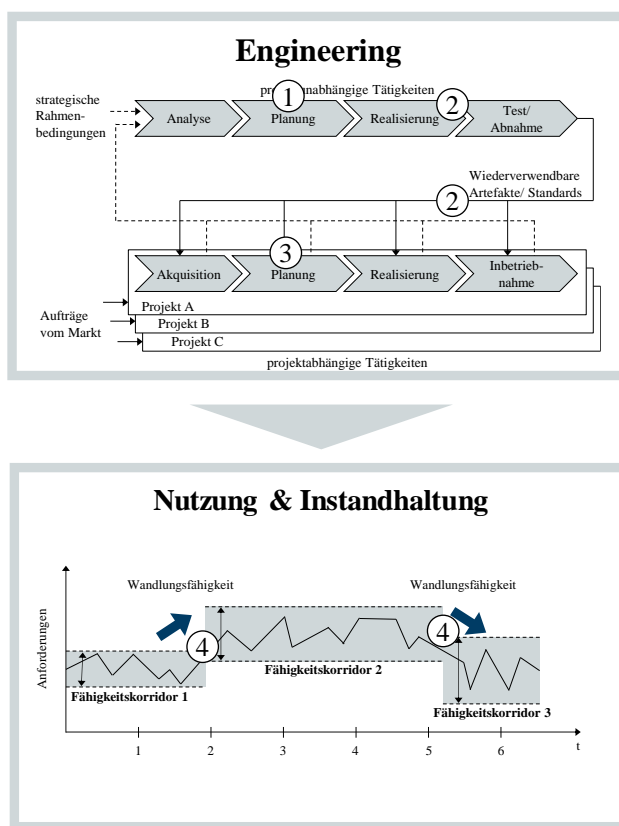
Ausgehend der zentralen Forschungsfrage (siehe Kapitel 1.2) sowie der weiteren Spezifikation der Wiederverwendbarkeit aus Kapitel 3.1 gilt es in der Planung der projektunabhängigen Tätigkeiten die Wiederverwendbarkeit zu analysieren. Hierbei sind sowohl wirtschaftliche Effekte als auch Informationen und Wissen aus den Lebensphasen zu berücksichtigen. In der Planung der projektabhängigen Tätigkeiten sind hierfür die detaillierten Wiederverwendungen der Module herauszustellen. Dabei ist zudem, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, eine Mehrfachverwendung der Module einzuplanen.

Angelehnt an das Kapitel 3.3 gilt es allgemein im Engineering immaterielle Artefakte wiederzuverwenden. Des Weiteren ist analog der Arbeiten von (Hell 2018) und (Jazdi et al. 2010) eine Speicherung wiederverwendbarer Artefakte und Module vorzusehen.

Da es sich wie von (Ko, Hu und Huang 2005) beschrieben bei der Wiederverwendbarkeit um ein probabilistisches Maß handelt und die in Kapitel 3.5 aufgeführten Störgrößen auf die Montage bzw. das Modul einwirken können, ist ausgehend der Situationen der Nutzungsphase das Risiko der Rekonfiguration zu analysieren und einzubeziehen.

#### Relevante Phasen der Arbeit

#### Anforderung (ausgehend Kapitel 3)



- ① Ganzheitliche Analyse der Wiederverwendbarkeit von Modulen
- ① Analyse wirtschaftlicher Effekte ausgehend der Wiederverwendung
- ① Bewertung der Informationen und Wissen über das Modul aus den Lebensphasen
- ② Wiederverwendung immaterieller Artefakte in den Planungsphasen
- ② Speicherung wiederverwendbarer Module und Artefakte
- ③ Analyse der effektiven Wiederverwendungen von Modulen
- ③ Planung der Mehrfachverwendung von Modulen in den einzelnen Projekten
- ④ Analyse des Risikos der Rekonfiguration von Modulen

Abbildung 16: Anforderungen ausgehend des Themenkomplexes Wiederverwendung

### 4 Fähigkeitsbasierte Planung von Anlagen

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben ist für die Analyse der effektiven Wiederverwendbarkeit von Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien eine ganzheitliche Planung dieser notwendig. Um Wiederverwendungen herauszustellen, sind die Fähigkeiten der Ressourcen mit den Anforderungen der Produkte und Prozesse zu vergleichen. Im Rahmen dieser Arbeit soll die Planung mit Hilfe eines fähigkeitsbasierten Ansatzes erfolgen. Hierzu soll zunächst auf den allgemeinen Planungs- und Engineeringprozess der Automobilendmontage (siehe Kapitel 4.1) und anschließend auf die Planung im Kontext der Digitalen Fabrik eingegangen werden (siehe Kapitel 4.2). Für eine fähigkeitsbasierte Planung ist vor allem eine Modellierung der notwendigen Daten, Informationen und des Wissens erforderlich. Daher werden die verschiedenen Arten der Modellierung in diesem Kapitel in Kürze vorgestellt (siehe Kapitel 4.3). Anschließend wird zudem auf relevante Methoden und Ansätze im Bereich der fähigkeitsbasierten Planung von Anlagen innerhalb der Automobilendmontage eingegangen (siehe Kapitel 4.4 und 4.5). Abschließend des Kapitels erfolgt eine Zusammenfassung der Anforderungen aus dem Themenkomplex der fähigkeitsbasierten Planung an die Methode dieser Arbeit (siehe Kapitel 4.6).

#### 4.1 Allgemeiner Planungs- und Engineeringprozess

Folgend soll in Kürze die Planung automatisierter Montagelinien sowie das Engineering von Anlagen beschrieben und Anforderungen an die Methode dieser Arbeit abgeleitet werden. Anlagen stellen allgemein einen Zusammenbau von Mechanik, Elektronik und Softwaretechnik dar und können so auch als mechatronische Systeme verstanden werden (VDI 2206, Kiefer 2007). Eine Entwicklungsmethodik speziell für mechatronische Systeme zeigt die (VDI 2206), ausgehend der exemplarisch das Engineering von Anlagen in dieser Arbeit beschrieben werden soll.

##### 4.1.1 Planung automatisierter Montagelinien

In der (VDI 5200) wird zwischen verschiedenen Planungsfällen unterschieden. Bezogen auf die Automobilendmontage wird zumeist zwischen einer Neu- und einer Umplanung unterschieden. Bei der Neuplanung wird eine Fabrik auf einer „grünen Wiese“ geplant. Die Umplanung betrifft hingegen bestehende Fabriken und kann z. B. eine Anpassung, Erweiterung oder Optimierung der bestehenden Fabrik sein. Die Planung selbst wird dabei nach der (VDI 5200) als *„Gedankliche Vorwegnahme eines angestrebten Ergebnisses einschließlich der zur Erreichung als erforderlich erachteten Handlungsabfolge.“* definiert. Angestrebte Ergebnisse bei der Planung der Automobilendmontage sind häufig die Integration neuer oder zusätzlicher Fahrzeuge in der Montagelinie oder die Optimierung bestehender Prozesse hinsichtlich Kosten, Qualität und Zeit. Konkrete Optimierungsziele sind z. B. nach der (VDI 5200):

- Flexibilität und Wandlungsfähigkeit

- Produkt- und Produktionsprozessqualität
- Wirtschaftlichkeit

Diese Ziele gehen, vor allem in der Automobilendmontage, häufig mit einer Automatisierung der manuellen Tätigkeiten einher. Durch Automatisierung können so Qualität, Produktivität und die Ergonomie gesteigert werden. Ebenso lassen sich durch effiziente Automatisierungen die Kosten der Montage senken (Hesse und Malisa 2016). Herausforderung hierbei ist jedoch stets die Entwicklung flexibler und wandlungsfähiger Automatisierungen bzw. Anlagen, die für die hohe Produktvarianz und unterschiedlichen strukturellen Rahmenbedingungen geeignet sind. Folgend sollen die relevanten Schritte bei der Planung automatisierter Montagelinien einmal am Beispiel eines allgemeinen Vorgehens der Montageplanung beschrieben werden.

Für die Montageplanung existieren eine Reihe von Methoden, wie z. B. von (Eversheim 1989), (REFA 1987), (Konold und Reger 2013) oder (Lotter und Wiendahl 2012) die sich in den groben Zügen ähneln. Im Rahmen dieser Arbeit wird exemplarisch die Planung automatisierter Montagelinien am Beispiel des Planungsvorgehens nach (Bullinger et al. 1986) erläutert. Wie in der Abbildung 17 dargestellt teilt sich das Vorgehen in sechs Schritte auf, bei denen regelmäßige Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und Bewertung der Ergebnisse feste Bestandteile sind. Ebenso sind Rücksprünge in vorherige Phasen vorgesehen. In dem ersten Schritt werden u. a. Planungsdaten gesammelt, Planungsziele festgelegt und Prinziplösungen entworfen. In der Ablaufplanung wird anschließend das Erzeugnis und der Montageablauf strukturiert und Arbeitsinhalte festgelegt. Mit Hilfe des Montageablaufs wird im dritten Schritt des Montagesystementwurfs das Layout inklusive der Materialbereitstellung, der Arbeitsstationen und der Verkettung dieser geplant. In dem folgenden Schritt vier erfolgt die Ausarbeitung und Konkretisierung des Layouts und der einzelnen Arbeitsstationen. Abschließend wird in Schritt fünf und sechs die Montage realisiert und in Betrieb genommen. Die einzelnen Tätigkeiten innerhalb dieser Schritte können (Bullinger et al. 1986) entnommen werden.

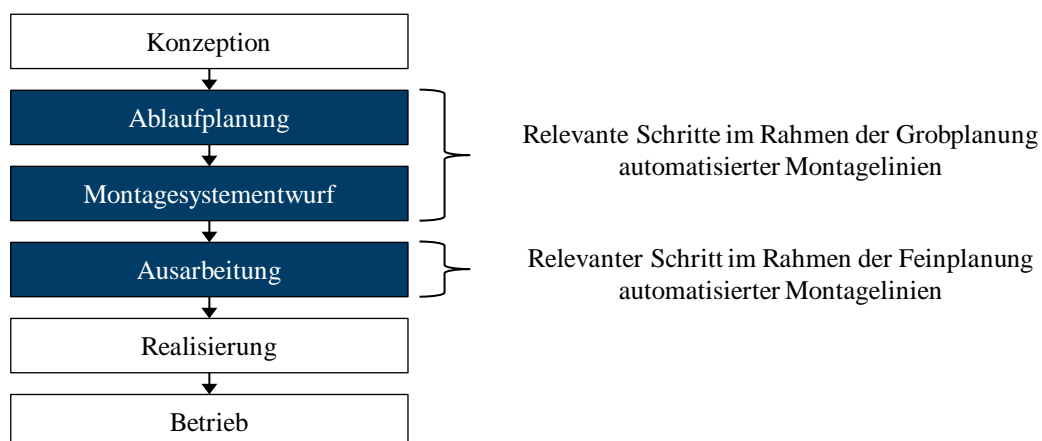


Abbildung 17: Planung automatisierter Montagelinien (in Anlehnung an Bullinger et al. 1986)

Im Hinblick auf die Automatisierung von Prozessen und Integration von Anlagen in die Montagelinie sind vor allem die Schritte zwei bis vier relevant. Innerhalb der Ablaufplanung sind so bereits Auswirkungen der Automatisierung von Prozessen auf dem Montageablauf zu untersuchen und zu berücksichtigen, wodurch z. B. eine erste Auswahl technisch möglicher Automatisierungen getroffen werden kann. Zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und Auslastung von Anlagen kann es zudem sinnvoll sein mehrere Prozesse mit einer Anlage zu automatisieren, in Kapitel 3.3 auch als Mehrfachverwendung bezeichnet. Hierfür sind verteilte manuelle Prozesse im Montageablauf zusammenzuziehen und in einer Anlage zu bündeln. Im Schritt des Montagesystementwurfs sind während der Planung des Layouts die Anlagen mit zu berücksichtigen und einzuplanen. Es ist zu kontrollieren, ob die Anlagen bei den strukturellen Rahmenbedingungen der Montagelinie wie z. B. den restriktiven Platzverhältnissen oder der vorgegebenen Fördertechnik integriert werden können. Zusammen mit der vorherigen Ablaufplanung kann dieser Schritt als Grobplanung von automatisierten Montagelinien angesehen werden. Ausgehend dieser kann so bereits eine erste Auswahl von Anlagen getroffen werden und die automatisierte Montagelinie hinsichtlich der verschiedenen Optimierungsziele bewertet werden.

Die Ausarbeitung des Layouts der automatisierten Montagelinie kann folgend auch als eine Feinplanung aufgefasst werden. Wie auch in der Grobplanung ist abschließend dieser die automatisierte Montagelinie hinsichtlich der Optimierungsziele zu bewerten. Sollten Automatisierungen nicht zu einer geplanten Verbesserung der Montage führen, so können diese über Rücksprünge in dem Vorgehen angepasst werden.

### **4.1.2 Engineering von Anlagen nach der VDI 2206**

Die (VDI 2206) stellt eine domänenübergreifende Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme vor. Das Vorgehen stützt sich im Wesentlichen auf einen allgemeinen Problemlösungszyklus auf der Mikroebene, einem V-Modell auf der Makroebene sowie vordefinierten Prozessbausteinen für die Bearbeitung wiederkehrender Arbeitsschritte.

Der Problemlösungszyklus als Mikrozyklus gliedert sich in die Schritte Situationsanalyse bzw. Zielübernahme, Analyse und Synthese, Analyse und Bewertung, Entscheidung sowie Planen des weiteren Vorgehens auf. Innerhalb der Analyse und Synthese werden Lösungen für das jeweilige Problem gesucht. Dies stellt sich in der Praxis als ein Wechselspiel zwischen Analyse und Synthese dar. In der Analyse und Bewertung werden die konkretisierten Lösungsvarianten im Detail bewertet. Dabei werden die Eigenschaften der Gesamtlösung sowie der einzelnen Teillösungen mit den Anforderungen verglichen. Anschließend wird entschieden, ob die Lösungen ein befriedigendes Ergebnis darstellen. Außerdem erfolgt im letzten Schritt eine kritische Betrachtung der guten und weniger guten Ergebnisse. Hierdurch lässt sich unter anderem Wissen für kommende Entwicklungen generieren.

Aus der Softwareentwicklung übernommen und auf Anforderungen mechatronischer Systeme angepasst wird ein V-Modell vorgestellt. Das V-Modell ist eine generische Vorgehensweise für den Entwurf mechatronischer Systeme und zielt auf die makroskopische Planung dieser ab. Wie in der Abbildung 18 dargestellt stellen aus der Aufgabenstellung abgeleitete Anforderungen den Ausgangspunkt des Vorgehens dar. Für ein ganzheitliches Engineering von Anlagen für die Automobilendmontage ist es sinnvoll, in den Anforderungen bereits sowohl die Produktvarianz als auch die strukturellen Rahmenbedingungen einer Montagelinie mit zu berücksichtigen. In der darauffolgenden Grobplanung der automatisierten Montagelinie stehen so folgend ausschließlich technisch geeignete Automatisierungslösungen zur Verfügung.

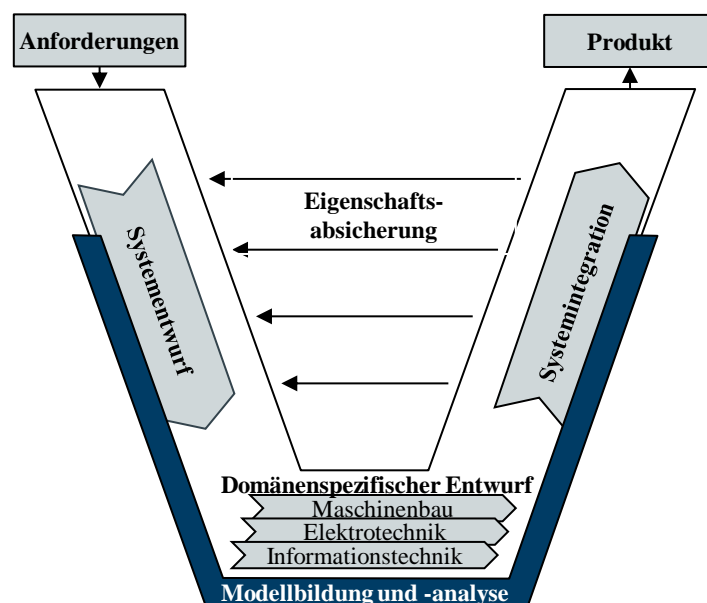


Abbildung 18: V-Modell des Makrozyklus (VDI 2206)

Im Systementwurf besteht das Ziel in der Festlegung eines domänenübergreifenden Lösungskonzepts, bei dem die wesentlichen physikalischen sowie logischen Wirkungsweisen des zu entwickelnden Produkts beschrieben werden. Dazu werden die Gesamtfunktionen des Systems in Teilfunktionen unterteilt und diesen werden folgend Wirkprinzipien bzw. Lösungsprinzipien zugeordnet. Im domänenspezifischen Entwurf werden die entwickelten Lösungskonzepte konkretisiert. Die einzelnen Domänen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik werden dabei zumeist getrennt voneinander betrachtet. In der Systemintegration werden die einzelnen Ergebnisse anschließend zu einem Gesamtsystem integriert, sodass eine Untersuchung des Gesamtsystems möglich ist. Fortlaufend wird so untersucht, ob das Lösungskonzept und die Systemeigenschaften mit den vorher definierten Anforderungen übereinstimmen. Unterstützt werden die einzelnen Phasen dabei mittels Modellen und rechnergestützten Werkzeugen zur Simulation. Zum Ende eines Durchlaufs des V-Modells steht ein Produkt, welches innerhalb dieser Arbeit die Anlage darstellt. Als dieses ist nicht zwangsläufig die fertige Anlage zu verstehen, sondern vielmehr eine Konkretisierung

der Anlage bzw. ein Reifegrad dieser. In weiteren Zyklen ist diese weiter zu konkretisieren, bis eine serienreife Anlage erreicht wurde.

### 4.1.3 Anforderungen zur ganzheitlichen Anlagenplanung

Für die Planung und Auswahl von Anlagenkonzepten innerhalb der Automobilendmontage ist es zielführend, nachfolgend der Anlagenplanung die Eignung des generierten Anlagenkonzepts im Kontext der Montagelinie zu untersuchen. Erst hierdurch können die Auswirkungen des Anlagenkonzepts auf den Montageablauf und das Montageumfeld herausgestellt werden. Eine ganzheitliche Anlagenplanung, in Bezug auf die Effekte der Anlage auf die Montage, erfordert somit eine Kombination der beschriebenen Vorgehen aus Kapitel 4.1.1 und Kapitel 4.1.2. In der Abbildung 19 ist hierfür ein entsprechendes Vorgehen für die Grobplanung von Anlagen im Kontext der Wiederverwendung nach der (VDI/ VDE 3695) aus Kapitel 3.2 dargestellt.

Allgemein sind in der Analyse sämtliche Anforderungen ausgehend der Produktvarianz sowie der strukturellen Gegebenheiten der Montagelinie zu berücksichtigen. Innerhalb der Planung ist zur effizienten Auslegung der Montagelinie eine Bündelung mehrerer Prozesse in einer Anlage vorzusehen, analog der Mehrfachverwendung aus Kapitel 3.3. Ebenso sind im darauffolgenden Schritt Anlagen in das Layout der Montagelinie zu integrieren, folgend auch als die Entwicklung eines Integrationskonzepts bezeichnet. Anlagen sind hierbei örtlich in der Montagelinie zu bündeln, um eine Mehrfachverwendung dieser zu realisieren. Zudem sind die Auswirkungen bzw. Effekte der Anlagen auf die Montagelinie zu überprüfen.

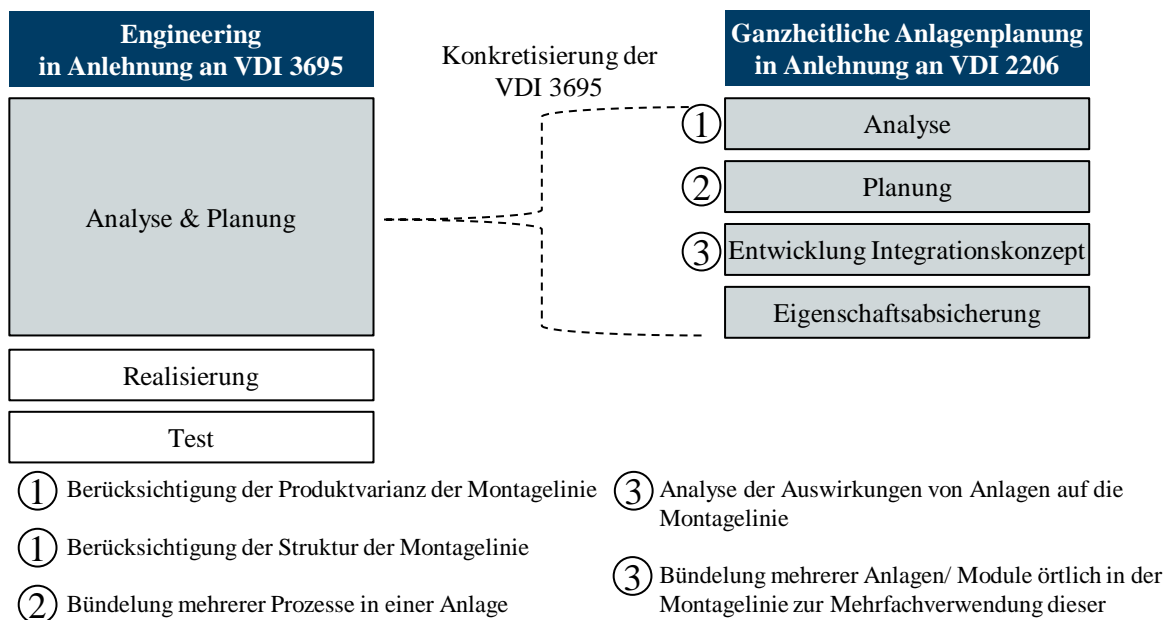


Abbildung 19: Ganzheitliche Anlagenplanung innerhalb der Automobilendmontage

### 4.2 Planung im Kontext der Digitalen Fabrik

Die Modellierung von Daten, Informationen und Wissen sowie digitale Planungs- und Analysemethoden sind Teile der Digitalen Fabrik. Folgend soll zunächst eine Definition der Digitalen Fabrik sowie ein Überblick über Modelle und Methoden der Digitalen Fabrik wiedergegeben werden.

#### Definition Digitale Fabrik

Für die Digitale Fabrik bestehen eine Reihe unterschiedlicher Definitionen und Ansätze. Nach (Bley und Franke 2000) sind vor allem das Modell- und Wissensmanagement sowie der Datenaustausch die Hauptpunkte der Digitalen Fabrik. Von (Dombrowski, Bothe und Tiedemann 2001) wird die Digitale Fabrik als eine rechnergestützte Abbildung aller Gestaltungsmerkmale und Prozesse der Fabrik sowie als ein virtuell betreibendes Modell basierend auf realen Daten definiert. (Schulze, Hinz und Schlechtweg 2002) sieht die Digitale Fabrik als das Bindeglied zwischen der Produktentwicklung und der Produktionsplanung. Für (Wiendahl 2002) stellt die Digitale Fabrik ein Rechenmodell aller Elemente und Prozesse einer Fabrik dar. (Westkämper, Bierschenk und Kuhlmann 2003) definiert die Digitale Fabrik als ein digitales Abbild der realen Fabrik, wodurch die Strukturen und Prozesse modelliert und simuliert werden können. (Mönch und Beyer 2006) versteht unter der Digitalen Fabrik vernetzte Digitale Modelle, Methoden und Werkzeuge und (Götz 2006) rechnergestützte Engineeringwerkzeuge für den Produktentstehungsprozess. Die verschiedenen Interpretationen der Digitalen Fabrik wurden mit Hilfe der (VDI 4499) vereinheitlicht. Nach dieser ist die Digitale Fabrik ein „Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden, und Werkzeugen – u. a. der Simulation und dreidimensionalen Visualisierung – die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden“. Das Ziel ist dabei „die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt“ (VDI 4499).

#### Modelle und Methoden der Digitalen Fabrik

Nach (Claus 2006) bezeichnet eine Methode eine „systematische zielgerichtete Vorgehensweise, sowie ein durchdachtes Verfahren, welches für eine Vielzahl von Problemen zu einer sinnvollen Lösung führt.“ Ein IT-gestütztes Werkzeug hingegen stellt die softwaretechnische Implementierung einer oder einer Kombination mehrerer Methoden dar. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus zunächst einzig auf der Methode selbst. In vielen Unternehmen existieren häufig bereits etablierte Softwaresysteme, weshalb die Auswahl von Softwaresystemen sowie die Implementierung innerhalb dieser Arbeit außen vorgelassen werden. Eine Übersicht der verschiedenen Methodenklassen wird in (Bracht, Geckler und Wenzel 2018) gezeigt. In dieser wird eine modellgestützte Methode mit dem Modell gleichgesetzt.



Ein Modell ist eine vereinfachte Nachbildung des geplanten oder existierenden Systems und seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Die Modellierung stellt in diesem Kontext die Umsetzung der Nachbildung des Systems in einem Modell dar (VDI 3633). Das Modell selbst unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens zum geplanten bzw. existierenden System. In diesem Sinne beinhaltet ein Modell nicht alle Attribute des Originals, sondern nur die Attribute, die dem Modellbildner oder Modellnutzer als relevant erscheinen. Ein Modell ist somit so abstrakt wie möglich und so detailliert wie nötig (ASIM 1997, VDI 3633, Stachowiak 1973). Abhängig der Aufgabenstellung und des zu untersuchenden Betrachtungsgegenstands unterscheiden sich die Modelle (Bracht, Geckler und Wenzel 2018). Mit dem Ziel der Konfiguration von Anlagenkonzepten für die Automobilendmontage stellt sich hieraus folgend die Frage, wie ein Modell für die Anlagenplanung der Automobilendmontage aussehen muss. Nach Kapitel 4.1 sind hierfür insbesondere Daten und Informationen bzgl. der Produkte, Prozesse, Ressourcen sowie der Struktur relevant. Zudem werden ebenfalls bereits erprobte und in der Montage im Betrieb stehende Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien betrachtet. Somit ist neben Daten und Informationen auch das Wissen von Experten bzgl. der Eigenschaften und Funktionsverhalten der Ressourcen einzubeziehen.

Die Modellierung von Produkten, Prozessen, Ressourcen und der Struktur der Montagelinie fällt in den Bereich der Darstellungs- und Gestaltungsmethoden. Die Erhebung der Informationen und Daten selbst soll innerhalb dieser Arbeit nicht vertieft werden. Auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit bzw. dem Konzept der Modellierung ist in weiterführenden Arbeiten zu klären, wie die Informationen und Daten strukturiert erhoben werden können. Darstellungs- und Gestaltungsmethoden können selbst weiter klassifiziert werden in unterschiedliche Sichtweisen (Bracht, Geckler und Wenzel 2018):

- **Prozess- und ablauforientierte Sicht:** Modellierung von Verhaltensweisen, Prozessen und Funktionen wie z. B. die Modellierung von Geschäftsprozessen, Materialflüssen von Waren oder Wertströmen zwischen Unternehmen.
- **Informations- und datenorientierte Sicht:** Modellierung von Daten- und Informationsflüssen, Datenstrukturen sowie Informationsobjekte einschließlich derer Beziehungen zueinander, z. B. zur Modellierung von Produkt-, Prozess- und Ressourcendaten und deren Beziehungen zueinander für eine Planungsdatenbasis.
- **Zustandsorientierte Sicht:** Modellierung von Zuständen und Zustandsübergängen für nebenläufige und synchrone Prozesse, z. B. die Beschreibung von Prozessoperatoren und Zuständen nach der (VDI/ VDE 3682) mit Hilfe von Ein- und Ausgangsgrößen wie Produkte, Energie und Informationen sowie der zur Umwandlung des Zustands notwendigen technischen Ressourcen.

- **Struktur- bzw. topologieorientierte Sicht:** Modellierung der räumlichen oder logischen Zuordnung von Objekten zueinander, z. B. zur Beschreibung von Durchsatzmengen von Material- und Informationsflüssen oder Lager- und Pufferbeständen, Organigrammen, Konstruktionszeichnungen oder Layoutzeichnungen.

Abhängig der Sicht unterscheiden sich die Modelle und damit auch die zu verwendenden Methoden (siehe (Bracht, Geckler und Wenzel 2018)). Im Rahmen der Konfiguration von Anlagenkonzepten gilt es, die Beziehungen innerhalb der Anlage als auch nach außen zu anderen Produkten, Prozessen, weiteren Anlagen oder der Struktur der Montagelinie zu beschreiben. Ebenso sind die einzelnen Objekte mit Merkmalen zu beschreiben. Hierfür eignet sich vor allem die Modellierung nach der Informations- und datenorientierten Sicht.

Ausgehend des Modells gilt es mit einer geeigneten Methode rechnergestützt Anlagen zu planen. Aufgrund der hohen Anzahl an verfügbaren Alternativen für Anlagenkomponenten wie z. B. eines Roboters stellt sich die Frage, welche Komponenten für eine Anlage und für die jeweilige Aufgabenstellung am besten geeignet sind. Zur Generierung und Auswahl von Anlagenkonzepten und zur Analyse der Wiederverwendbarkeit sind somit mathematische Planungs- und Analysemethoden notwendig. Die Auswahl von Anlagenkomponenten fällt hierbei vor allem in den Bereich der mathematischen Optimierung. Für eine Darstellung verschiedener mathematischer Optimierungsmethoden wird auf (Domschke et al. 2015) verwiesen.

### 4.3 Modellierung von Daten, Informationen und Wissen

Die Begriffe Daten, Informationen und Wissen grenzen sich entsprechend der Abbildung 20 voneinander ab. Auf der untersten Ebene stehen Zeichen z. B. Ziffern oder Buchstaben, die durch Ordnungsregeln bzw. einer Syntax zu Daten werden. Zu Informationen werden die Daten, wenn ein Bezug zu einem Bedeutungskontext hergestellt wird. Wissen stellt folgend die Vernetzung der Informationen dar, welches von individuellen Erfahrungen geprägt sowie kontextspezifisch und personengebunden ist (Rehäuser und Krcmar 2021, North, Brandner und Steininger 2016).

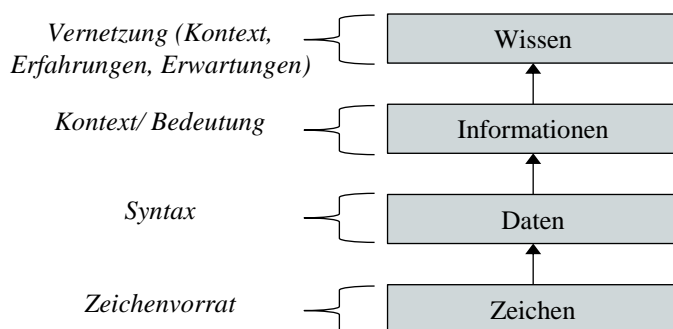


Abbildung 20: Systematik der Begriffe Zeichen, Daten, Informationen und Wissen (in Anlehnung an Rehäuser und Krcmar 2021)

Neben Daten und Informationen ist das Wissen über die Produkte, Prozesse und Ressourcen ausgehend der Lebensphasen einzubeziehen. Im Folgenden soll daher zunächst auf die Modellierung von Daten und Informationen und anschließend auf die Modellierung von Wissen eingegangen werden. Ebenso soll die Modellierung bzw. Repräsentation von Objekten im Rahmen der Verwaltungsschale der Industrie 4.0 vorgestellt werden.

### 4.3.1 Modellierung von Daten und Informationen

Methoden zur Informations- und Datenmodellierung bilden Daten- und Informationsflüsse, Datenstrukturen sowie Informationsobjekte einschließlich derer Beziehungen zueinander ab. Beispiele hierfür sind Datenflussdiagramme und Entity-Relationship-Modelle (ER-Modelle). ER-Modelle ermöglichen so eine statische Beschreibung von Informationszusammenhängen und stellen die Grundlage für ein Datenbanksystem dar. Objekte werden dabei als Gegenstände bzw. Entitäten beschrieben, die wiederum über Beziehungen miteinander verbunden sind. Entitäten können zudem weiter über Eigenschaften bzw. Attribute beschrieben werden. Eine weitere Beschreibung der Entitäten wird über Schlüsselattribute erreicht, über die eine Entität eindeutig identifiziert werden kann. Die Beziehung zwischen den Entitäten kann des Weiteren über Kardinalitäten bestimmt werden. Verwendung finden die Methoden der Informations- und Datenmodellierung vor allem in der Modellierung von Produkt-, Prozess- und Ressourcendaten sowie deren Beziehungen zueinander (Bracht, Geckler und Wenzel 2018). Die Dreiteilung von Produkt, Prozess und Ressource, kurz PPR, hat sich bereits in der Praxis in Softwarewerkzeugen der Digitalen Fabrik wie z. B. AutomationML bewährt. Ebenso ist eine Modellierung mit Hilfe anderer Softwarewerkzeuge wie z. B. in Product Lifecycle Management (PLM) Systemen oder auch CAx-Systemen möglich. Bei dem PPR-Konzept kann dabei grundlegend zwischen den drei verschiedenen Sichten unterschieden werden (Schleipen und Drath 2009, Drath 2010, Drath 2021b, Drath 2021a):

- **Produktzentrierte Sicht:** Das Modell beschreibt Produkte, die durch Ausführung von Prozessen auf Ressourcen entstehen.
- **Prozesszentrierte Sicht:** Das Modell beschreibt Prozesse, die Ressourcen benötigen um Produkte herzustellen.
- **Ressourcenzentrierte Sicht:** Das Modell beschreibt Ressourcen, mit denen Prozesse zum Bearbeiten oder Fertigen von Produkten ausgeführt werden können.

In (Pfrommer, Schleipen und Beyerer 2013) wird das Konzept des PPR-Datenmodells zudem um Fähigkeiten (engl. Skills) erweitert. Die Fähigkeiten beziehen sich hierbei auf die Fähigkeit einer Ressource einen bestimmten Prozess ausführen zu können. Der Ansatz der Modellierung von Produkt, Prozess, Ressource und Fähigkeiten (PPRS) wird zudem bereits von einer Vielzahl von Autoren aufgegriffen. In Kapitel 4.5 sollen diese genauer untersucht werden.

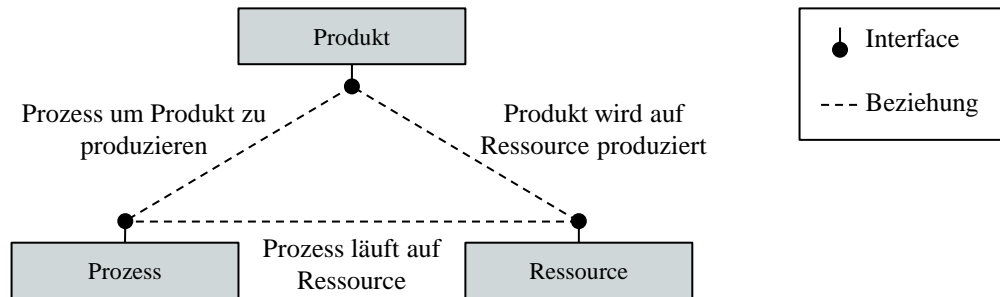


Abbildung 21: PPR-Datenmodell (in Anlehnung an Drath 2010, Schleipen und Drath 2009)

### 4.3.2 Modellierung von Wissen

Ein Wissensmodell stellt explizites Wissen über einen Sachverhalt dar. Mit der Umwandlung der verschiedenen Wissensformen in implizites und explizites Wissen hat sich (Nonaka, Takeuchi und Mader 2012) beschäftigt. Die Umwandlung von implizitem Wissen wie z. B. ausgehend von Beobachtungen oder Erfahrungen in explizites Wissen wird so als Externalisierung und die Umwandlung von explizitem Wissen wie z. B. Dokumente in implizites Wissen als Kombination bezeichnet. Für den Umgang mit Wissen beschreiben u. a. (Probst, Raub und Romhardt 2006) und (Reinmann-Rothmeier et al. 2001) Wissensmanagement-Prozesse. (Reinmann-Rothmeier et al. 2001) definiert in Anlehnung an (Probst, Raub und Romhardt 2006) das sog. Münchner-Wissensmanagement-Modell, welches aus den vier Prozessbereichen Wissensrepräsentation, Wissenskommunikation, Wissensnutzung und Wissensgenerierung besteht. Innerhalb der Wissensrepräsentation geht es vor allem um die Identifikation von Wissen sowie um die Dokumentation und Speicherung von explizitem Wissen.

Mit der Modellierung bzw. Repräsentation von Wissen beschäftigen sich ebenfalls wissensbasierte Systeme. Die wichtigste Eigenschaft dieser ist die Trennung zwischen der Repräsentation des Wissens bzw. der Wissensbasis und der Wissensverarbeitung. Im Gegensatz zu konventionellen Programmieransätzen erfolgt in wissensbasierten Systemen eine Trennung zwischen der Problembeschreibung und der Problemlösung. Außerdem lässt sich das Wissen über den Anwendungsbereich direkt ausdrücken. Systeme bei denen das Wissen von Experten stammt werden auch Expertensysteme genannt (Beierle und Kern-Isherner 2019). (Puppe 1991) definiert ein Expertensystem als ein Programm mit Hilfe dessen das Spezialwissen und die Schlussfolgerungsfähigkeiten qualifizierter Fachleute für ein spezifisches Aufgabengebiet nachgestellt werden können. Hierfür muss das Wissen der Experten bzw. Fachleute formalisiert, im Computer repräsentiert und entsprechend einer Problemlösungsstrategie manipuliert werden können.

Entscheidend für die Wissensverarbeitung ist die Art und Weise der Repräsentation des Wissens (Beierle und Kern-Isherner 2019). Die Repräsentation von Wissen kann über eine deklarative oder über eine prozedurale Darstellung erfolgen. Bei der deklarativen Darstellung

werden Sachverhalte beschreibend durch Daten dargestellt. Hingegen wird eine prozedurale Darstellung immer in einer vom System ausführbaren Form dargestellt, wie z. B. ein Programmcode. Die prozedurale Darstellungsform ist für eine spezifische Anwendung ausgerichtet, womit bei weiteren Anwendungen das Wissen redundant dargestellt werden muss (Krickhahn und Radig 1987). Eine nachträgliche Änderung bzw. Anpassung des Wissens ist zudem schwierig, da ein direkter Eingriff in den Programmcode notwendig wäre (Rudolf 2006). In einer deklarativen Darstellung besteht der Vorteil, dass das Wissen anwendungsunabhängig ist und durch Ablegen des abgeschlossenen Wissens in einer Wissensbasis ein Austausch, eine Erweiterung oder auch Modifizierung möglich ist, ohne den Programmcode ändern zu müssen (Krickhahn und Radig 1987). Im Rahmen dieser Arbeit sind die deklarativen Darstellungen relevant, da innerhalb der Planung und Wiederverwendung von Anlagen die Wissensbasis ausgehend der Erfahrungen aus der Erprobung oder Nutzung von Anlagen angepasst, erweitert oder modifiziert werden muss. Eine Übersicht der verschiedenen Formen der Wissensrepräsentationen, unterteilt nach deklarativen und prozeduralen Darstellungen, wird in (Rudolf 2006, Hamelmann 1996, Altenkrüger und Büttner 1992) gezeigt. Für die Konstruktion, also der Zusammensetzung von Lösungen aus mehreren einzelnen Bausteinen, sind nach (Puppe 1991) vor allem Regeln, objektorientierte Darstellungen sowie Constraints von Bedeutung. Diese werden folgend näher im Detail erläutert.

### **Regeln**

Regeln sind formalisierte Konditionalsätze der Form WENN-DANN und stellen einen guten Kompromiss zwischen Verständlichkeit der Wissensrepräsentation und formalen Ansprüchen dar (Beierle und Kern-Isherner 2019).

Nach der (DIN 66241) können Regeln mit Hilfe von Entscheidungstabellen abgebildet werden. Diese dienen als Beschreibungsmittel, um formalisierte Entscheidungsprozesse festzulegen. Mit einer Regel wird festgelegt, unter welchen Voraussetzungen bzw. Bedingungen bestimmte Maßnahmen bzw. Aktionen auszuführen sind. Im Detail setzt sich eine Bedingung aus einem Textteil und einem Bedingungsanzeiger zusammen, die gemeinsam die Voraussetzung beschreiben. Eine Aktion setzt sich entsprechend ebenfalls aus einem Textteil und einem Aktionszeiger zusammen, die gemeinsam die zu ergreifende Maßnahme beschreiben. Eine Regel wird nur dann erfasst, wenn kein Bedingungsanzeiger dieser Regel den Fall ausschließt. Die einzelnen Bedingungsanzeiger einer Regel werden mit UND verknüpft. Ebenso werden die Aktionen untereinander mit UND verknüpft. Die Gesamtheit aller Anzeiger einer Spalte stellt somit eine Regel dar, die Gesamtheit der Bedingungsanzeiger definiert die Voraussetzungen und die Gesamtheit der Aktionszeiger beschreibt die beim Eintritt dieser Voraussetzungen durchzuführenden Maßnahmen (DIN 66241).

Tabelle 3: Entscheidungstabelle (DIN 66241)

|  |            | Identifikationsteil |   |   |   |                       |
|--|------------|---------------------|---|---|---|-----------------------|
| Erste Bedingung<br>·<br>·<br>·<br>Letzte Bedingung | Regel      | b                   | · | · | b | Fallbeschreibung      |
|  |            | ·                   | · | · | · |                       |
|  | ELSE-Regel | ·                   | · | · | · | <b>Bedingungsteil</b> |
|  |            | b                   | · | · | b |                       |
|  |            |                     |   |   |   | Bedingungsanzeiger    |
| Erste Aktion<br>·<br>·<br>·<br>Letzte Aktion       | a          | a                   | · | · | a | Aktionsanzeiger       |
|  |            | ·                   | · | · | · |                       |
|  | a          | ·                   | · | · | · | <b>Aktionsteil</b>    |
|  |            | a                   | · | · | a |                       |
|  |            |                     |   |   |   |                       |
| <b>Textteil</b>                                    |            | <b>Regelteil</b>    |   |   |   |                       |

### Objektorientierte Darstellungen/ Frames

Objektorientierte Wissensrepräsentationen oder Frames sind spezielle Datenstrukturen zur Darstellung des gesamten Wissens der Objekte. Ein Objekt wird mit Hilfe von Eigenschaften und Werten (z. B. Werten oder Typbezeichnungen) beschrieben. Diese Eigenschaften nennt man auch Attribute, die unterschiedliche Ausprägungen besitzen können (Stycznski, Rudion und Naumann 2017). Objekte werden zudem mit Hilfe hierarchischer Strukturen dargestellt und besitzen Vererbungsmechanismen. Besitzt ein unteres Objekt z. B. ein Attribut, so wird dieses Attribut ebenfalls der nächsthöheren Ebene vererbt (Neitzel 2013, Stycznski, Rudion und Naumann 2017).

Neben der Vererbung von Eigenschaften besitzen die Objekte Relationen zueinander, worüber ebenfalls Wissen über die Beziehungen der Objekte repräsentiert werden kann. Neben der reinen Zuordnung des Verhältnisses der Objekte lässt sich ebenfalls abbilden, wie viele Objekte zueinander im Bezug stehen (Stycznski, Rudion und Naumann 2017).

### Constraints

Constraints (deutsch. Einschränkungen) sind als wechselseitige Abhängigkeiten zwischen Objekten und deren Attributen zu verstehen. Im Gegensatz zu Regeln, die gerichtete Zusammenhänge darstellen, stellen Constraints ungerichtete Zusammenhänge dar, die nach jeder Variablen aufgelöst werden können. Hierüber können wechselseitige Beziehungen zwischen Komponenten und Merkmalen abgebildet werden und z. B. bestimmte Variantenkombinationen explizit ausgeschlossen werden. Im Wesentlichen werden bei Constraints keine Aktionen wie es bei Regeln der Fall ist definiert, sondern ausschließlich die Lösungssuche eingeschränkt. In vielen Systemen werden Regeln und Constraints miteinander kombiniert. Die Wertbestimmung von Komponenten oder Merkmalen erfolgt z. B. mit Hilfe von Regeln und über Constraints wird die Konsistenz sichergestellt (Rudolf 2006).

### 4.3.3 Verwaltungsschale Industrie 4.0

Die Verwaltungsschale ist als digitales Abbild bzw. virtuelle Repräsentation eines jeden relevanten Gegenstands (Assets) in einer vernetzten Produktion zu verstehen. Alle wesentlichen Eigenschaften eines Assets werden in dieser Verwaltungsschale gespeichert, wie z. B. physische Eigenschaften, Prozesswerte, Zustände oder auch Fähigkeiten. Neben der Speicherung dient die Verwaltungsschale zudem als Kommunikationsschnittstelle über die ein Asset in die vernetzte Produktion eingebunden ist und es möglich ist, auf die Informationen des Assets zuzugreifen und dieses zu kontrollieren (BMWK 2022). Ein Gegenstand der mindestens passiv kommunikationsfähig ist und mit einer Verwaltungsschale umgeben ist kann auch als Industrie 4.0-Komponente (kurz I4.0-Komponente) bezeichnet werden. Beispiele einer I4.0-Komponente sind Produktionssysteme, Maschinen, Stationen oder konzeptionell wichtige Baugruppen einer Maschine. Eine detaillierte Übersicht von Kriterien zur Definition von Gegenständen als I4.0-Komponente ist in (VDI/ VDE 2015) zu finden. Das Konzept der I4.0-Komponente geht zudem einher mit der Modularisierung von Produktionssystemen zur Rekonfiguration und Wiederverwendung von Assets (VDI/ VDE 2015).

Jedes Asset einer I4.0-Komponente in der Verwaltungsschale ist bzgl. seines Anwendungsfalls hinreichend genau zu beschreiben. Anwendungsfälle können hierbei sehr unterschiedlich sein, z. B. Identifikation, Kommunikation, Condition Monitoring, Engineering oder auch Konfiguration. Im Rahmen dieser Arbeit steht vor allem das Engineering und die Konfiguration von I4.0 Komponenten im Fokus. Nach dem Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0) ist hierfür vor allem die funktionale Ebene entscheidend. Mit Hilfe einer Beschreibung der Funktionen können folgend die vom Produkt an das Betriebsmittel gestellten Anforderungen ausgedrückt und die Funktionen vom Betriebsmittel mit diesen verglichen werden. Hierfür sind die Assets auf einer funktionalen Ebene in die Verwaltungsschale einzubinden und eine standardisierte Beschreibung der Funktionen bzw. Fähigkeiten der jeweiligen Assets erforderlich. Die vom Asset bereitgestellten Funktionalitäten sind mit Hilfe von Attributen bzw. Merkmalen zu beschreiben, welche z. B. in Merkmale der Funktion, Eingangs- und Ausgangsgrößen gegliedert werden können. Eingangs- und Ausgangsgrößen könnten z. B. Informationen über Stoff-, Energie- oder Informationsflüsse sein (ZVEI 2016).

Die Verwaltungsschale und der Gegenstand bzw. die I4.0-Komponente können räumlich getrennt vorliegen, wie z. B. in einer Bibliothek. Anforderung hierbei ist, dass alle relevanten Informationen über den Lebenszyklus in der Verwaltungsschale vorhanden sind (siehe Abbildung 22) (Hell 2018).

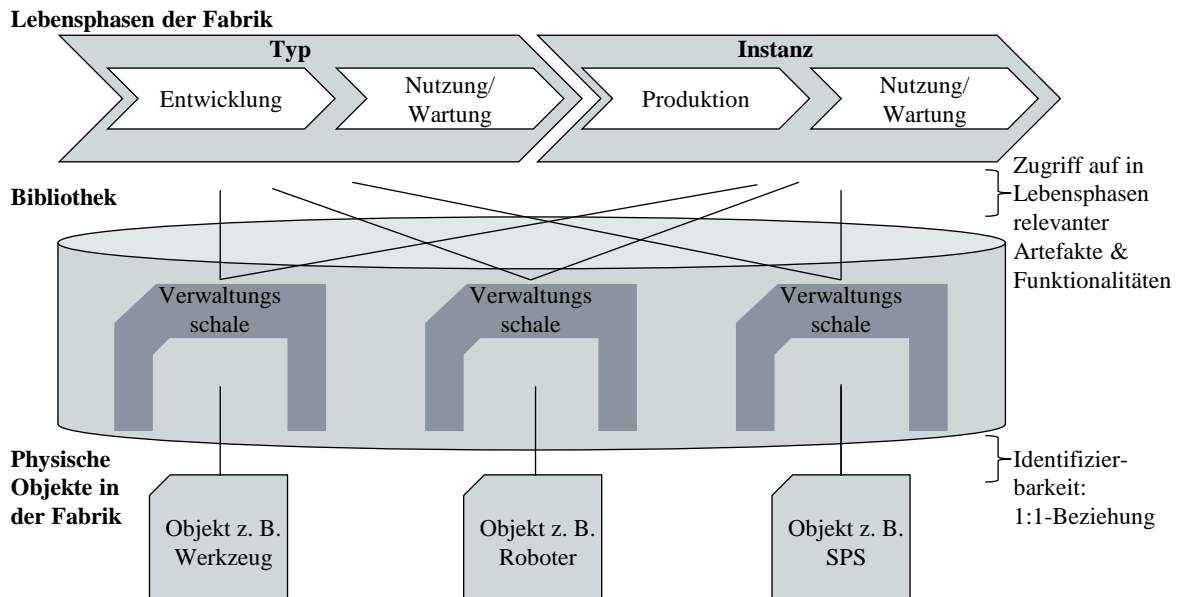


Abbildung 22: Industrie 4.0-Verwaltungsschale (VDI/ VDE 2015)

### 4.4 Relevante Methoden zur Bündelung von Objekten

Nach Kapitel 3.3 ist innerhalb der fähigkeitsbasierten Planung eine Bündelung mehrerer Prozesse in einer Ressource anzustreben (Mehrfachverwendung), womit der Nutzungsgrad der Ressource optimiert werden soll. Ebenso sind mehrere Ressourcen örtlich im Layout zu bündeln, sodass ggf. Ressourcen mehrfach genutzt werden können. Dies stellt ein Gruppierungsproblem dar, welches die Clusteranalyse aus dem Gebiet der multivariaten Analysemethoden adressiert. Folgend sollen daher die verschiedenen Methoden der Clusteranalyse beschrieben werden.

Bei der Clusteranalyse besteht das Ziel darin Objekte zu Gruppen bzw. Cluster zusammenzufassen, die hinsichtlich bestimmter Eigenschaften oder Merkmale als möglichst homogen angesehen werden können. Dazu unterteilt sich die Clusteranalyse in drei Ablaufschritte (Backhaus et al. 2015):

1. Auswahl eines Proximitätsmaßes, mit dem die Ähnlichkeiten bzw. Unähnlichkeiten zwischen Objekten gemessen werden können
2. Auswahl eines Gruppierungsverfahrens, mit dem eine Zusammenfassung bzw. Zerlegung von ähnlichen Objekten zu Gruppen erfolgen kann
3. Bestimmung einer Clusteranzahl

Zur Bestimmung der Ähnlichkeit von Objekten existiert in Abhängigkeit des Skalenniveaus der betrachteten Merkmale eine Vielzahl an Proximitätsmaßen. So kann z. B. zwischen Proximitätsmaßen mit metrischem, nominalen und binären Skalenniveau unterschieden werden. Eine Übersicht hierzu ist in (Backhaus et al. 2015) zu finden.

Für die Clusteranalyse existieren eine Vielzahl an Gruppierungsverfahren (siehe Abbildung 23). Die bedeutendsten Verfahren sind zum einen das hierarchische und zum anderen das



partitionierende Verfahren. Bei dem partitionierenden Verfahren wird von einer gegebenen Gruppierung der Objekte bzw. Startpartition ausgegangen. Die genaue Clusteranzahl wird hierbei bereits durch die Startpartition vorgegeben. Aufbauend dieser werden einzelne Elemente der Gruppen mit Hilfe eines Austauschalgorithmus zwischen den Gruppen so lange verschoben, bis eine definierte Zielfunktion ein Optimum erreicht hat. Im Gegensatz hierzu wird bei hierarchischen Verfahren eine Gruppierung nicht mehr aufgelöst. Agglomerative hierarchische Verfahren gehen von einer kleinsten Gruppierung aus, bei dem jedes Objekt seine eigene Gruppe bildet. Anschließend wird für alle Gruppen eine Ähnlichkeit berechnet und die Gruppen mit der größten Ähnlichkeit werden zusammengefasst. Dies wird solange wiederholt bis alle Objekte in einer Gruppe enthalten sind. Die genaue Clusteranzahl ist im Anschluss mit Hilfe von statischen Kriterien zu bestimmen (Backhaus et al. 2015). Bei dem divisiven hierarchischen Verfahren wird im Gegensatz zum agglomerativen Verfahren von einer großen Gruppe ausgegangen, die alle Objekte enthält. Anschließend wird die große Gruppe in kleinere, hierarchisch tiefere Gruppen unterteilt (Cleve und Lämmel 2016). Hierarchische Clusterverfahren lassen sich weiter nach ihren Fusionierungseigenschaften unterteilen. Zu erwähnen sind hier die verschiedenen Verfahren wie z. B. Single-Linkage, Complete-Linkage, Average-Linkage, Centroid, Median und Ward (Backhaus et al. 2015).

Weitere Clusterverfahren sind z. B. graphentheoretisch, dichte basiert oder basieren auf neuronalen Netzen. Bei den dichte basierten Verfahren werden z. B. Objekte zusammengefasst, die einen geringen Abstand zueinander haben. Es werden Gruppen gebildet, sodass sich in der Nähe eines jeden Objekts eine minimale Anzahl weiterer Objekte befindet (Cleve und Lämmel 2016).

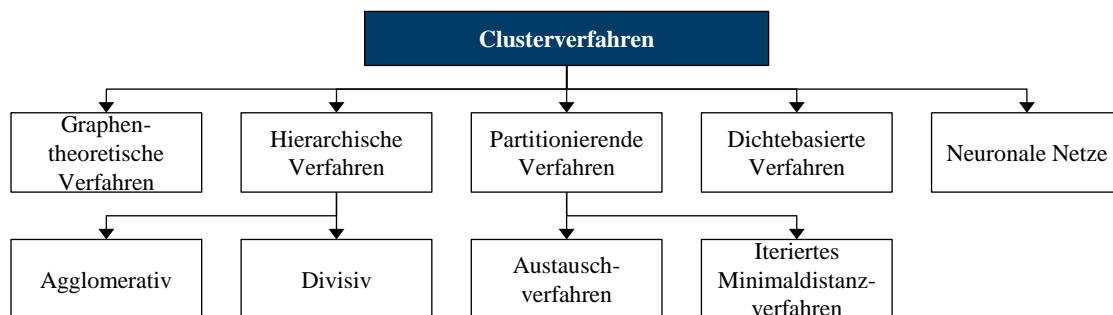


Abbildung 23: Clusterverfahren (in Anlehnung an Cleve und Lämmel 2016, Backhaus et al. 2015)

### 4.5 Relevante Ansätze im Themenkomplex fähigkeitsbasierte Planung

Die fähigkeitsbasierte Planung von Anlagenkonzepten kann allgemein in zwei Punkte unterteilt werden. Zum einen in die Modellierung von Produkt, Prozess und der Ressource analog des Ansatzes von (Schleipen und Drath 2009). Zum anderen in die Konfiguration bzw. Rekonfiguration von Anlagenkonzepten selbst. Relevante Ansätze bzgl. dieser beiden Punkte sollen in diesem Kapitel zusammengefasst werden.

### **Ansätze der PPR(S) Modellierung**

Eine objektorientierte Modellierung von Produkt, Prozess und Ressource stellt die (VDI/VDE 3682) dar. Die Prozesse werden in dieser graphisch durch ein Netz beschrieben, welches prozesstechnisch definierte Zustände und Prozessoperatoren sowie die prozessausführenden Ressourcen mit Kanten verbindet. Diese formalisierte Prozessbeschreibung wird von weiteren Arbeiten verwendet. (Kathrein et al. 2019c) vergleicht z. B. die verschiedenen Prozessmodellierungssprachen bzgl. ihrer Eignung für die Modellierung von Produktstrukturen, Prozessen, Ressourcen, Hierarchie-Strukturen, PPR-Beziehungen sowie Konsistenzen miteinander. Die Formale Prozessbeschreibung stellt sich hierbei als am geeignetsten dar und ist die Einzige, die eine Modellierung von PPR ermöglicht. Um Entwurfsentscheidungen nachzuvollziehen, modelliert (Kathrein et al. 2019a, Kathrein et al. 2019b) PPR-Wissen mit der formalen Prozessbeschreibung. Durch die Konsistenz-Beziehungen können Produkte und Ressourcen miteinander verknüpft werden, was über die (VDI/ VDE 3682) hinausgeht. Somit können Einschränkungen bzgl. bestimmter Parametereinstellungen zwischen Produkt und Prozess oder der Einstellungen der Ressource basierend auf dem Prozess formuliert werden.

Eine Erweiterung der Modellierung von PPR mit einer Fähigkeits-Definition zeigt (Pfrommer, Schleipen und Beyerer 2013). Als ein Skill wird hierbei die Fähigkeit einer Ressource verstanden, einen bestimmten Prozess ausführen zu können. Sie stellen zudem damit die Verbindung zwischen Ressourcen und Prozessen dar. Zusätzlich werden Aufgaben (engl. Tasks) eingeführt. Diese stellen die Anwendung eines Skills auf einen bestimmten Produkttyp dar. Tasks bilden zudem eine direkte Beziehung zwischen den Entitäten Produkt und Skill (Pfrommer, Schleipen und Beyerer 2013).

Das Konzept der Modellierung von PPRS wird von verschiedenen Autoren aufgegriffen, u. a. von (Hammerstingl und Reinhart 2017), (Kluge 2011) und (Smale und Ratchev 2009). Für Fähigkeiten existieren so bereits verschiedene Definitionen sowie eine Reihe spezifischer und unterschiedlicher Parameterklassen. Motiviert ausgehend dieser Vielzahl an bestehenden semantischen Definitionen von Fähigkeiten führt (Hammerstingl und Reinhart 2017) eine konsolidierte Taxonomie für Fähigkeiten von Automatisierungsgeräten für die Montage ein. Ziel dessen ist eine Übersicht prozessbezogener lösungsneutraler Fähigkeiten für ein einheitliches Verständnis von Daten und Informationen, sodass diese interoperabel zwischen Systemen ausgetauscht werden können. (Hammerstingl und Reinhart 2017) definiert so eine elementare Fähigkeit als *„durch ein Gerät angebotene lösungsneutrale Funktionalität, welche aus einer aufgabenspezifischen Sicht (Prozesssicht) beschrieben ist“*. Lösungsneutral bezieht sich hierbei auf eine herstellerunabhängige Modellierung. Sie können zudem standardisiert oder anwendungsspezifisch sein. Grundlegende Parameter von elementaren Fähigkeiten können außerdem weiter in prozess- und produktbezogene Parameter

unterteilt werden. Zusätzlich werden zusammengesetzte Fähigkeiten definiert, die ein „*Zusammenschluss von Geräten angebotene höherwertige lösungsneutrale Funktionalität*“ darstellen (Hammerstingl und Reinhart 2017). Die Beschreibung der Gesamtstruktur bzw. der Hierarchieebenen von Fähigkeiten erfolgt u. a. in Anlehnung an (Backhaus und Reinhart 2015), (Lotter und Wiendahl 2012), (Schmidt 1992), (VDI 2860) und (DIN 8593-0). Weitere Modellierungen zeigen (Huckaby und Christensen 2012), (Keddis, Kainz und Zoitl 2014, Keddis, Kainz und Zoitl 2015), (Backhaus 2016) und (Kiefer 2007). (Backhaus 2016) z. B. unterscheidet zwischen einem Aufgaben- und Umweltmodell. In dem Aufgabenmodell werden dabei sämtliche Anforderungen ausgehend der Produkte und Prozesse einschließlich der Montagereihenfolge beschrieben. Diesem gegenüber beinhaltet das Umweltmodell die Ressourcen des Montagesystems und deren Fähigkeiten.

### **Ansätze der fähigkeitsbasierten Konfiguration und Rekonfiguration**

Auf Basis der Modellierung von PPRS soll innerhalb dieser Arbeit eine Konfiguration von Anlagenkonzepten stattfinden, um die Wiederverwendungen von Modulen analysieren zu können. Hierzu sollen folgend sowohl Ansätze untersucht werden, die sich mit einer fähigkeitsbasierten Konfiguration als auch Rekonfiguration auseinandersetzen. Ansätze der Layoutplanung werden im Rahmen dieser Arbeit nicht thematisiert, da bei der Integration der Anlagen von einem bereits bestehenden Layout ausgegangen wird. Ausgehend der Anforderung der Bündelung mehrerer Produkte und Prozesse aus Kapitel 4.1.3 sowie der Einführung der Clusteranalyse in Kapitel 4.4 stellt sich die Frage der Ähnlichkeiten von Produkten und Prozessen. Ansätze die eine Ermittlung von Ähnlichkeiten beinhalten sollen daher ebenfalls herausgestellt werden. In der Tabelle 4 sind dazu die für diese Arbeit relevanten Ansätze aufgeführt.

Arbeiten die sich mit einer fähigkeitsbasierten Konfiguration von Anlagen beschäftigen zeigen u. a. (Jonas 2000) und (Kluge 2011). In der Arbeit von (Jonas 2000) erfolgt die Zuordnung von Produkt, Prozess und Ressourcen auf Basis einer eindeutigen Beschreibung. Generierte Planungsalternativen werden für weitere Planungen in einer Datenbank hinterlegt. (Kluge 2011) stützt sich bei der Konfiguration von Anlagen hingegen auf einen modularen Aufbau dieser. Innerhalb der Konfiguration werden zudem bereits verschiedene zukünftige Szenarien berücksichtigt und Alternativen für diese generiert.

## 4 Fähigkeitsbasierte Planung von Anlagen

Tabelle 4: Identifizierte Ansätze zur fähigkeitsbasierten Planung

| Quelle  | Beschreibung   | Kategorie                       |
|---|--|---------------------------------|
| (Obst, Doherr und Urbas 2013)                         | Beurteilung der Ähnlichkeiten der Attribute zweier Anforderungen mit Hilfe von Metriken  | Ähnlichkeit                     |
| (Jonas 2000)  | Rechnergestützte Planung von Montageanlagen  | Konfiguration                   |
| (Cuiper 2000)   | Rechnergestützte Planung von Montagevorgängen  | Konfiguration                   |
| (Smale und Ratchev 2010)                              | Fähigkeitsbasierte Planung von Rekonfigurationen eines rekonfigurierbaren Montagesystems | Rekonfiguration & Ähnlichkeit   |
| (Kluge 2011)  | Fähigkeitsbasierte Planung modularer Montagesysteme                                      | Konfiguration & Rekonfiguration |
| (Ferreira und Lohse 2012, Ferreira et al. 2012)       | Fähigkeitsbasierte Konfiguration von mechatronischen Systemen/ Montagesystemen           | Konfiguration                   |
| (Järvenpää 2012)                                      | Fähigkeitsbasierte Rekonfiguration von Produktionssystemen                               | Rekonfiguration                 |
| (Ahmad et al. 2017, Ahmad et al. 2015)                | Modellierung von PPR und automatische Konfiguration von Montagesystemen                  | Konfiguration                   |
| (Michniewicz 2019)                                    | Automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung in der Montage                          | Konfiguration                   |
| (Hoang, Hildebrandt und Fay 2018, Hoang und Fay 2019) | Modellierung von Fähigkeiten für die Rekonfiguration von Ressourcen                      | Rekonfiguration                 |

Mit der Rekonfiguration von bestehenden Anlagen beschäftigen sich z. B. die Arbeiten von (Smale und Ratchev 2010, Hees 2017) und (Järvenpää 2012). (Smale und Ratchev 2010) verwendet so für die Zuordnung von Fähigkeiten eine Vergleichsmatrix, in der erforderliche Fähigkeiten ausgehend des Produkts mit bestehenden Fähigkeiten des Montagesystems verglichen werden. Hierbei wird zwischen exakt übereinstimmenden, kompatiblen, und Fähigkeiten mit keiner realisierbaren Gemeinsamkeit unterschieden. Auf Basis des Ergebnisses erfolgt anschließend eine Neukonfiguration. (Järvenpää 2012) verwendet für die Zuordnung von Fähigkeiten und Anforderungen eine eindeutige Beschreibung sowie einen regelbasierten Abgleich von Merkmalen.

Innerhalb der Rekonfiguration von bestehenden Anlagen werden in der Arbeit von (Smale und Ratchev 2010) ebenfalls Gemeinsamkeiten bzw. Ähnlichkeiten von Fähigkeiten bewertet. Als Ähnlichkeitskoeffizient wird das Verhältnis aus der Anzahl gleicher Ähnlichkeiten zu der Anzahl an maximal gleichen Ähnlichkeiten verwendet. Ausgehend dieses Koeffizienten wird für eine minimale Rekonfiguration die optimale Produktionsreihenfolge ermittelt. Einen anderen Ansatz zeigt (Obst, Doherr und Urbas 2013). Nicht basierend auf den Fähigkeiten sondern auf den Attributen ermittelt (Obst, Doherr und Urbas 2013) mit Hilfe von Ähnlichkeitsmetriken die Ähnlichkeit zweier Anforderungen.

Neben den erwähnten Ansätzen wird in (Bauernhansl, Hompel und Vogel-Heuser 2014) das Konzept der agentenbasierten, dynamischen Rekonfiguration von vernetzten intelligenten Produktionsanlagen thematisiert. Im Rahmen von Industrie 4.0 und dem Einsatz von cyber-

physischen Systemen (siehe (Bendel 2021, Biffel, Lüder und Gerhard 2017)), kurz CPS, sollen Produktionsanlagen Änderungen im Produktionsumfeld selbstständig wahrnehmen und sich daran anpassen können.

### 4.6 Anforderungen an die Methode aus der fähigkeitsbasierten Planung

In diesem Kapitel sollen folgend die Anforderungen an die Methode ausgehend der fähigkeitsbasierten Planung hergeleitet und zusammengefasst werden. Das Vorgehen für eine ganzheitliche Anlagenplanung wurde bereits in Kapitel 4.1.3 dargestellt. Zur Transformation hin zur fähigkeitsbasierten Planung sind die Teilschritte Analyse und Planung durch die Modellierung von PPRS und der fähigkeitsbasierten Konfiguration zu ersetzen (siehe Abbildung 24). Hierbei stellen sich zum einen Anforderungen an die Methode bzgl. der Modellierung der Anforderungen und Fähigkeiten. Zum anderen sind innerhalb der fähigkeitsbasierten Konfiguration Ähnlichkeiten von Produkten und Prozessen zu analysieren (siehe Kapitel 4.4), um eine Bündelung bzw. Mehrfachverwendung zu realisieren. Des Weiteren sind Informationen und das Wissen aus Tests und dem Betrieb von Modulen einzubeziehen, so dass Kausalitäten und Verhaltenseigenschaften während der Konfiguration berücksichtigt werden können (siehe Kapitel 4.3.2).

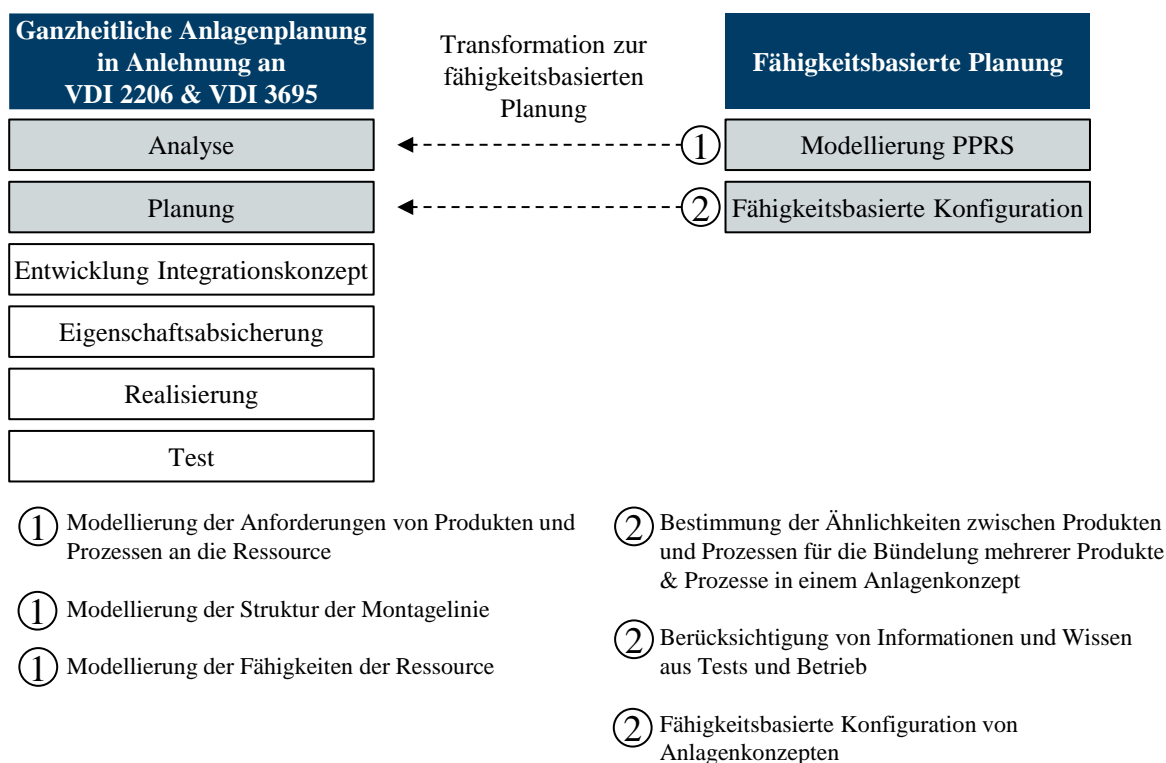


Abbildung 24: Ganzheitliche Anlagenplanung unter Einsatz einer fähigkeitsbasierten Planung

## 5 Forschungsbedarf

Wie in Kapitel 1 hergeleitet, ist die grundsätzliche Zielsetzung dieser Arbeit die Steigerung der Wiederverwendungen von Anlagen. Innerhalb dieser Arbeit gilt es potentielle Wiederverwendungen von Anlagen und Anlagenkomponenten durch eine fähigkeitsbasierte Planung herauszustellen. Mit Hilfe der Modellierung von PPR soll hierbei vor allem die Vereinfachung der Komplexität des Anlagenengineerings sowie eine objektive Bewertung der Eignung von Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien für die jeweiligen Montageprozesse adressiert werden. Ausgehend der geplanten Wiederverwendungen soll folgend eine ganzheitliche Analyse der Wiederverwendbarkeit der betrachteten Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien erfolgen. Diese Arbeit adressiert somit ein zweistufiges Vorgehen, unterteilt in die Planung von Wiederverwendungen und anschließende Bewertung der Wiederverwendbarkeit. Die zentrale Forschungsfrage die sich hierbei stellt lautet dabei wie folgt:

*Wie können wiederverwendbare Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien für das turbulente Produktionsumfeld der Automobilendmontage im Anlagenengineering ganzheitlich analysiert und bewertet werden?*

Zur weiteren Konkretisierung konnte die Forschungsfrage weiter unterteilt werden in die Themenschwerpunkte der Analyse der Wiederverwendbarkeit von Anlagen und Anlagenkomponenten sowie der fähigkeitsbasierten Planung, für eine gezielte Wiederverwendung spezifischer Anlagen und Anlagenkomponenten. Für die Analyse der Wiederverwendbarkeit wurden in Kapitel 3 bestehende Ansätze bzgl. der Bewertung der Wiederverwendbarkeit untersucht. Die übergeordnete Forschungsfrage lautet dabei wie folgt:

*Wie kann die Wiederverwendbarkeit von Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien unter Berücksichtigung zukünftiger Situationen des Produktionsumfeldes der Automobilendmontage analysiert werden?*

Für den Themenschwerpunkt der fähigkeitsbasierten Planung wurden in Kapitel 4 bestehende Ansätze untersucht. Bezogen auf das Produktionsumfeld der Automobilendmontage (siehe Kapitel 2) stellt sich hinsichtlich einer Wiederverwendung von Anlagen und Anlagenkomponenten die Forschungsfrage :

*Wie kann eine fähigkeitsbasierte Planung von Anlagen für die Automobilendmontage durchgeführt werden, unter Berücksichtigung der Komplexität ausgehend der Produktvarianz und den technologischen Alternativen?*

Abschließend der Kapitel 3 und 4 wurden zudem jeweils Anforderungen ausgehend des jeweiligen Kapitels an die Methode dieser Arbeit beschrieben. Analog des Forschungsvorgehens nach (Ulrich, Dyllick und Robst 1984) werden die bestehenden Ansätze und Methoden

hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen bewertet. Ausgehend dieser Bewertung werden anschließend offene Forschungslücken der Themenschwerpunkte Wiederverwendung und fähigkeitsbasierte Planung identifiziert und beschrieben. Abschließend werden die herausgestellten Forschungslücken strukturiert und zusammengefasst.

### 5.1 Zusammenfassung der Anforderungen an die Methode

In der Abbildung 25 sind die Anforderungen der Kapitel 3 und 4 zusammengefasst. Die Anforderungen können sowohl der Analyse der Wiederverwendbarkeit, der fähigkeitsbasierten Planung als auch unabhängig hiervon dem Engineering allgemein zugeordnet werden. Die Anforderungen eins bis fünf zielen z. B. vor allem auf die Analyse der Wiederverwendbarkeit und resultieren primär aus Kapitel 3. Die Anforderungen an die fähigkeitsbasierte Planung der Wiederverwendungen leiten sich hingegen aus den Kapiteln 3 und 4 ab. Innerhalb der Modellierung der Anforderungen der Produkte und Prozesse ist so z. B. die Produktvarianz zu berücksichtigen und abzubilden. Ebenso sind Ähnlichkeiten von Anforderungen zu bestimmen, sodass ausgehend dieser eine Bündelung von ähnlichen Produkten und Prozessen in einem Anlagenkonzept vorgenommen werden kann. Die Mehrfachverwendung von Modulen aus Kapitel 3 stellt ebenfalls eine Anforderung an die Planung dar.

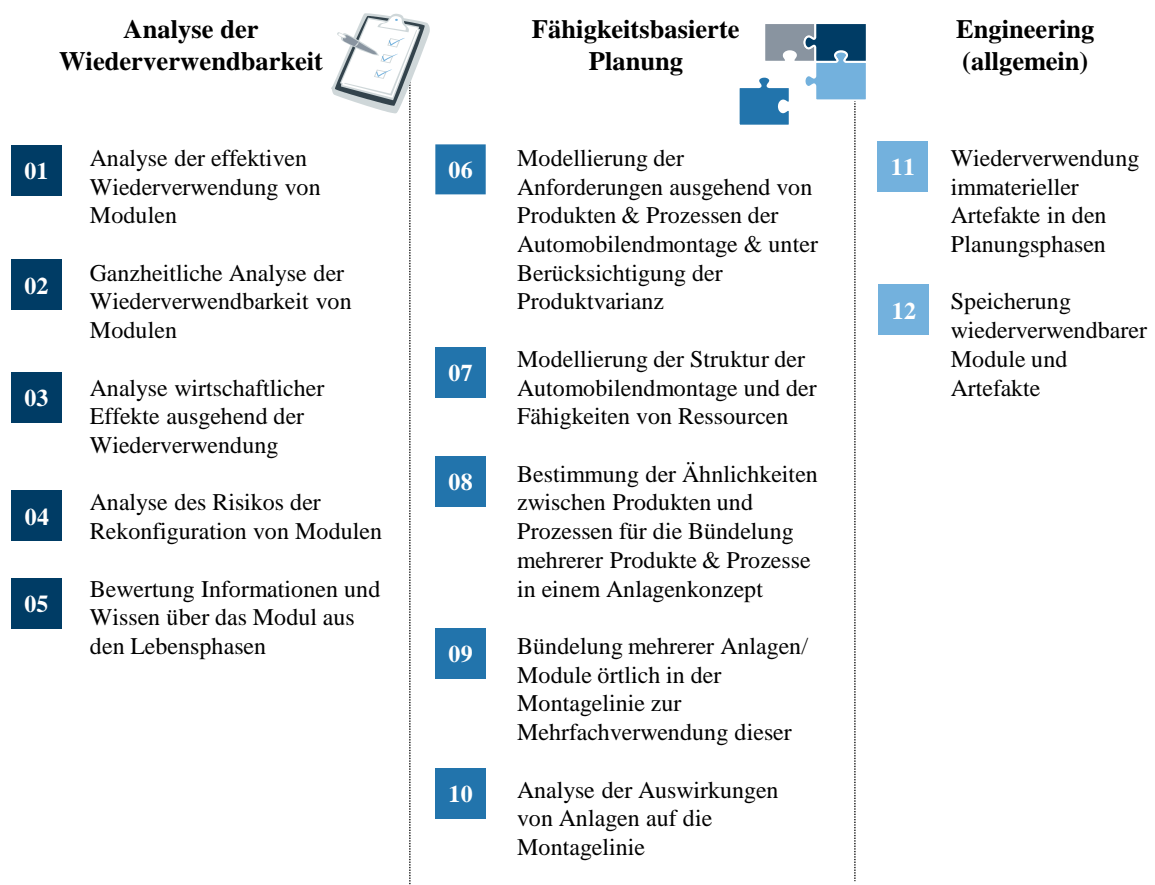


Abbildung 25: Zusammenfassung der Anforderungen an die Methode der Arbeit

Für die Analyse der Auswirkungen von Anlagen auf die Montagelinie (Anforderung 10) ist eine Prozessplanung der Montagelinie unter Einbeziehung des Anlagenkonzepts erforderlich.

Die Prozessplanung kann sowohl manuell als auch automatisiert mit Hilfe von Methoden des Assembly Line Balancing (siehe (Boysen, Fliedner und Scholl 2007)) durchgeführt werden. Innerhalb dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Planung der Anlagenkonzepte und weniger auf der Montagelinie selbst. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit von einer manuellen Planung der Montagelinie ausgegangen. Die Anforderung zehn wird damit innerhalb der Analyse der offenen Forschungslücken außen vorgelassen.

Die Anforderungen elf und zwölf werden innerhalb der Bewertung der Erfüllung der Anforderungen ebenfalls nicht berücksichtigt, da diese nicht direkt Schwerpunkt der Analyse der Wiederverwendbarkeit oder der fähigkeitsbasierten Planung sind. Grund ist, dass eine Speicherung wiederverwendbarer Module bereits in einer Vielzahl von Forschungsansätzen vorgestellt wurde, wie z. B. in der Arbeit von (Hell 2018). Für die Entwicklung eines durchgängigen Datenmanagements für wiederverwendbare Module und Artefakte sind neben der fähigkeitsbasierten Planung zudem weitere Anwendungsfälle wie z. B. Themen des Condition-Monitorings zu untersuchen und einzubeziehen. Aufbauend der Anwendungsfälle sowie dem Konzept der Verwaltungsschale (siehe Kapitel 4.3.3) ist das Thema des Datenmanagements in folgenden Forschungsarbeiten zu klären. Ebenso ist mit einem ganzheitlichen Blick auf die verschiedenen Anwendungsfälle zu beantworten, wie eine Wiederverwendung von immateriellen Artefakten in den verschiedenen Lebensphasen auszusehen hat. Ausgehend der Ergebnisse dieser Arbeit wird auf diese beiden Punkte zum Ende der Arbeit wiederholt eingegangen (siehe Kapitel 9.5).

Die Erfüllung der übrigen Anforderungen ist im Anhang 1, in der Tabelle 11 mit Hilfe von sog. „Harvey Balls“ bewertet. Allgemein zeigt sich hierbei, dass die Anforderungen von den bestehenden Ansätzen derzeit nicht ganzheitlich und adäquat erfüllt werden. Im Detail wird in den folgenden Kapiteln auf die offenen Forschungsfragen unter Berücksichtigung der bestehenden Ansätze eingegangen.

### **5.2 Offene Forschungslücken der Analyse der Wiederverwendbarkeit**

Ausgehend der Bewertung der Erfüllung der Anforderungen in Kapitel 5.1 sollen folgend die offenen Forschungslücken zu den Anforderungen identifiziert werden. Innerhalb dieses Kapitels liegt der Fokus vor allem auf den Forschungslücken der Anforderungen eins bis fünf.

Die Anforderung eins der Analyse der Wiederverwendbarkeit fordert einen detaillierten Abgleich der Eignung von Fähigkeiten der Anlage für die spezifischen Produkt-/ Prozessanforderungen. Die Anforderung zielt damit sowohl auf den Themenschwerpunkt der Bewertung der Wiederverwendbarkeit als auch auf den der fähigkeitsbasierten Planung. Viele Ansätze wie z. B. von (Ko, Hu und Huang 2005), (Smale und Ratchev 2009) oder (Kluge 2011) thematisieren einen Abgleich von Fähigkeiten einer Ressource mit den Anforderungen von Produkten und Prozessen. Spezifisch für die Automobilendmontage existieren jedoch keine



Ansätze, welche direkt auf den Anwendungsfall dieser Arbeit übertragen werden können. Dieser Zustand unterstreicht noch einmal die Bedeutsamkeit der zentralen Forschungsfrage für die fähigkeitsbasierte Planung der Wiederverwendungen aus Kapitel 1.2.

Die einhergehende fähigkeitsbasierte Konfiguration von Anlagenkonzepten zur Ermittlung der effektiven Wiederverwendungen der Anforderung eins stellt zugleich ein Zuordnungsproblem zwischen Produkt, Prozess und Ressource dar. Ausgehend der Vielfalt von möglichen Anlagenkomponenten oder auch Produkten und Prozessen gilt es ein optimales Anlagenkonzept zu konfigurieren. In (Domschke et al. 2015) werden hierfür Methoden der kombinatorischen Optimierung vorgestellt. Mit der Annahme einer hohen Anzahl möglicher Alternativen sowie einer hohen Anzahl an spezifischen Restriktionen ausgehend der Automobilendmontage als auch ausgehend von Kompatibilitätsbedingungen zwischen den Komponenten selbst sind heuristische Optimierungsverfahren zu bevorzugen. Somit stellt sich die Frage nach einem geeigneten Verfahren für die Zuordnung und Optimierung von PPR für die Automobilendmontage. Ausgehend der Anforderung eins ergibt sich somit die folgende Forschungsfrage:

*„Wie kann eine Zuordnung und Optimierung von PPR für die Automobilendmontage durchgeführt werden, unter der Betrachtung bekannter Strukturbedingungen?“*

Während der Konfiguration von Anlagenkonzepten wird innerhalb dieser Arbeit von bekannten Strukturbedingungen und einer konventionellen Automobilendmontage ausgegangen (siehe Kapitel 2.2). Neue Fertigungsformen, wie sie in (Bauernhansl, Fechter und Dietz 2020) untersucht werden, stellen bisher Ausnahmen dar und besitzen zum Teil unbekannte Bedingungen. Ein vollständiger Abgleich von Fähigkeiten und Anforderungen könnte dadurch nicht sichergestellt werden.

Produkte, Prozesse und Ressourcen können wie in Kapitel 2 gezeigt in verschiedene Hierarchieebenen unterteilt werden. (Hell 2018) und (Biffl, Lüder und Gerhard 2017) zeigen ebenfalls, dass die Wiederverwendung immaterieller Artefakte stark von der Ebene der Ressource abhängt. Im Rahmen der fähigkeitsbasierten Konfiguration stellt sich daher in Zusammenhang mit der Zuordnung und Optimierung von PPR die weiterführende Frage nach der Ebene von PPR. Innerhalb der Arbeit gilt es herauszustellen, auf welcher Ebene eine Zuordnung und Optimierung von PPR für die Wiederverwendung von Anlagen und Anlagenkomponenten sinnvoll ist. Somit ergibt sich die zweite Forschungsfrage ausgehend der Anforderungen eins:

*„Auf welcher Ebene von Produkt, Prozess und Ressource ist die Konfiguration und Optimierung von PPR durchzuführen?“*

Die Anforderung zwei adressiert allgemein die zentrale Forschungsfrage bzgl. der fähigkeitsbasierten Planung aus Kapitel 1.2. Über diese und einer Vorauswahl des Moduls, können zielgerichtet die Wiederverwendungen bestimmter Module herausgestellt werden. Für die Analyse einzelner bestehender oder auch neuer Module kann es jedoch sinnvoll sein, ausgehend einer bereits bestehenden Referenzmenge an Anlagenkonzepten die Wiederverwendungen zu untersuchen. Hierdurch ist es möglich Aufwände einzusparen und schnelle Aussagen bzgl. der Eignung eines Moduls zu erhalten. Die Überprüfung der Eignung eines Moduls für verschiedene, bereits bestehende Anlagenkonzepte kann auch als die Analyse des Wiederverwendungsgrades des Moduls bezeichnet werden. Angelehnt an den Abdeckungsgrad der (VDI/ VDE 3695) soll der Wiederverwendungsgrad den Anteil bzw. das Verhältnis beschreiben, für wie viele Anlagenkonzepte einer Referenzmenge ein Modul geeignet ist. Für die Analyse des Wiederverwendungsgrades zeigt u. a. (Smale und Ratchev 2010) einen Ansatz, der zum Teil die Anforderung zwei adressiert. Dabei wird über eine Matrix die Fähigkeit des Systems mit vielen verschiedenen Produktanforderungen verglichen. Vollständig wird die Anforderung zwei jedoch von keinem Ansatz erfüllt, denn zur Überprüfung der Wiederverwendungen neuer Module ist nicht nur die Fähigkeit des Moduls mit den Anforderungen von Produkten und Prozessen abzugleichen, sondern es sind ebenso die Beziehungen zu den anderen Modulen als auch der Struktur der Montagelinie zu berücksichtigen. Vorgehensweisen die sich mit der Wiederverwendung im Engineering beschäftigen werden u. a. in (VDI/ VDE 3695), (Hell 2018) und (Jazdi et al. 2010) gezeigt. Diese thematisieren zwar die Speicherung der Module und Artefakte in einer Bibliothek, jedoch wird den Domain-Experten die sich aus dieser Bibliothek bedienen keine Auskunft über die Eignung der Module hinsichtlich ihrer Wiederverwendbarkeit geliefert. In vielen Engineering-Unternehmen ist die Wiederverwendung folgend nicht systematisch durchdacht und basiert häufig nur auf der Erfahrung einzelner Personen. Die Wiederverwendung findet so weniger systematisch sondern viel mehr als Ad-hoc-Wiederverwendung statt (Hady und Wozny 2012, VDI/ VDE 3695). Trends wie die schnelle Markteinführung und die steigende Anzahl neuer Module (siehe Kapitel 1.1) fordern zudem, dass immer wieder neue Module hinsichtlich ihrer Eignung überprüft werden. Für diese Arbeit ergibt sich ausgehend dessen für die Anforderung zwei die Forschungsfrage:

*„Wie kann ausgehend einer Referenzmenge an Anlagenkonzepten der Wiederverwendungsgrad einzelner Module analysiert und bewertet werden?“*

Die Anforderung drei wird nur von den wenigsten der Ansätze zum Teil erfüllt. (Hell 2018) stellt detailliert wiederverwendbare Artefakte abhängig der Ebene und Lebensphase der Resource heraus. Des Weiteren wird der Abdeckungsgrad, also der Anteil standardisierter wiederverwendbarer Artefakte, von der Anzahl der Gesamtartefakte eines Entwurfs bestimmt (VDI/ VDE 3695). Die Auswirkungen auf die Kosten werden jedoch nicht gezielt thematisiert. In der Arbeit von (Kluge 2011) ist es hingegen umgekehrt. Hier wird erwähnt, dass

Kosten durch die Wiederverwendung vor allem in der Rekonfiguration von Anlagen gespart werden können. Eine detaillierte Analyse dieser Kosteneffekte sowie Berücksichtigung der Anzahl an Wiederverwendungen findet jedoch nicht statt. Andere Arbeiten wie von (Schuh 2012) heben den Nutzen von Skaleneffekten, reduzierten Entwicklungszeiten und Lernkurveneffekten ausgehend der Standardisierung und Wiederverwendung gleicher Module hervor. Eine detaillierte Analyse der Kosteneffekte wird jedoch auch hier nicht vorgestellt. Eine detaillierte Ermittlung des Abdeckungsgrades von Artefakten, vor allem immateriellen Artefakten, würde hohe zeitliche Aufwände mit sich bringen, in dem z. B. die Planungsstunden für die Anpassung immaterieller Artefakte untersucht werden. Ebenso variieren die Kosteneinsparungen häufig zwischen den verschiedenen Anlagenherstellern, womit eine exakte Bestimmung von Kosteneffekten nicht möglich ist. Um die Kosteneffekte in dieser Arbeit zu berücksichtigen, sollen daher viel mehr die Kostenursachen und Stellhebel für Kosteneinsparungen noch einmal übersichtlich herausgestellt werden.

Die Berücksichtigung zukünftiger Szenarien oder auch die Analyse und Bewertung möglicher Rekonfigurationsaufwände findet in einer Reihe von Ansätzen statt. Ansätze die z. B. ausschließlich eine Bewertung von Rekonfigurationsaufwänden vorstellen sind (Youssef und ElMaraghy 2006), (Hees 2017) und (Zäh et al. 2011). Ebenso existieren eine Reihe von Ansätzen welche im Rahmen der Planung von Rekonfigurationen den Rekonfigurationsaufwand berücksichtigen wie z. B. Ansätze von (Järvenpää 2012), (Kluge 2011) und (Hoang und Fay 2019). Zwar untersuchen Ansätze wie von (Youssef und ElMaraghy 2006) und (Hees 2017) den Aufwand z. B. über das gewichtete Verhältnis von zu rekonfigurierenden Komponenten und der Gesamtanzahl von Komponenten des Systems, jedoch wird die Eintrittswahrscheinlichkeit der Rekonfigurationen nicht berücksichtigt. Der Ansatz von (Ko, Hu und Huang 2005) erfüllt die Anforderung vier am stärksten, in dem die Wiederverwendbarkeit als probabilistisches Maß bewertet wird. Es findet jedoch nur eine Bewertung der Wahrscheinlichkeit statt, mit dem das System mit festen Fähigkeiten für die neuen Anforderungen kompatibel ist. Eine detaillierte Ermittlung des Rekonfigurationsaufwandes in Relation mit der Eintrittswahrscheinlichkeit von zukünftigen Szenarien wird auch hier nicht thematisiert. Der Ansatz von (Röpke 2019) konzentriert sich ebenso im Schwerpunkt auf die Analyse des Risikos der Wiederverwendung von Entwurfselementen, jedoch wird auch hierbei kein Rekonfigurationsaufwand von Modulen bewertet. Allgemeine Methoden der Risikobeurteilung aus Kapitel 3.6 können für den konkreten Anwendungsfall dieser Arbeit auch nicht direkt übernommen werden und erfordern eine Überprüfung ihrer Eignung. Ausgehend der Anforderung vier leitet sich daher die folgende Forschungsfrage ab:

*„Wie kann das Risiko einer Rekonfiguration von Modulen für verändernde Rahmenbedingungen in der Automobilendmontage analysiert und bewertet werden?“*

Die Anforderung fünf wird überwiegend von den Ansätzen von (Hell 2018), (Röpke 2019) und (Abdi 2005) adressiert. In keinem der Ansätze werden jedoch für die Wiederverwendung von Modulen relevante Informationen oder Wissen aus den Lebensphasen beschrieben. Ansätze die sich mit der Bewertung der Performance von Modulen auseinandersetzen wie z. B. von (Koren, Hu und Weber 1988) bewerten zumeist Punkte wie die Qualität und Verfügbarkeit. (Stallinger et al. 2011) stellt im Detail eine Reihe von Kriterien für die Verbesserung des Engineerings mechatronischer Objekte dar. Im Hinblick auf die Analyse und Bewertung der Wiederverwendbarkeit stellt sich im Kontext der Kriterien von (Stallinger et al. 2011) die Frage, welche Anforderungen wiederverwendbare Module für die Automobilendmontage erfüllen müssen. Angelehnt an die Overall Equipment Effectiveness (siehe (REFA 2022)), kurz OEE, gilt es die Effektivität von Modulen hinsichtlich der Wiederverwendung herauszustellen und zu vergleichen. Ebenso sind wirtschaftliche Faktoren dabei zu berücksichtigen, womit nicht nur die Effektivität sondern auch Effizienz bei der Wiederverwendung eine große Rolle spielen. Ausgehend der Anforderung fünf ergibt sich so die folgende Forschungsfrage:

*„Wie können die Effektivität und Effizienz der Wiederverwendung von Modulen für die Automobilendmontage analysiert und verglichen werden?“*

### **5.3 Offene Forschungslücken der fähigkeitsbasierten Planung**

Es existieren bereits eine Vielzahl von Arbeiten, die sich mit einer Modellierung von PPR bzw. PPRS beschäftigen. So wird z. B. von (Backhaus 2016) als auch von (Michniewicz 2019) ein Modell verwendet, welches sich in ein Anforderungs- und Umweltmodell unterteilen lässt. Ebenso wird für die Beschreibung von Anforderungen bereits von (Smale und Ratchev 2009) ein Ansatz verwendet, bei dem die Anforderungen als erforderliche Skills und die Funktionalitäten der Ressource als bestehende Skills beschrieben werden. Eine lösungsneutrale Konsolidierung der verschiedenen Modellierungen von Fähigkeiten wird zudem in (Hammerstingl und Reinhart 2017) vorgestellt. Keine der Arbeiten thematisiert bzw. prüft jedoch eine direkte Übertragbarkeit der Modellierung auf die Eigenschaften und Rahmenbedingungen der Automobilendmontage. Zudem werden die spezifischen strukturellen Eigenschaften und Rahmenbedingungen der Automobilendmontage (siehe Kapitel 2) nicht berücksichtigt. Daher soll innerhalb dieser Arbeit die Übertragbarkeit der Modellierungen geprüft werden und unter Zuhilfenahme der „Best-Practice“ Ansätze bzw. der Kombination dieser ein spezifisches Modell für die Automobilendmontage hergeleitet werden. Für die Modellierung der Anforderungen von Produkt und Prozess, siehe Anforderung sechs, ergibt sich so die Forschungsfrage:

*„Wie können die Anforderungen ausgehend von Produkten und Prozessen aus der Automobilendmontage in einem Modell dargestellt werden?“*

Für die Modellierung der Fähigkeiten der Ressource sowie der Struktur der Automobilendmontage (siehe Anforderung sieben) ergibt sich analog die Forschungsfrage:

*„Wie können strukturelle Eigenschaften und Rahmenbedingungen der Automobilendmontage sowie die Fähigkeiten von Ressourcen in einem Modell dargestellt werden?“*

In bisherigen Ansätzen zur Modellierung von Produkt und Prozess wird zudem eine Varianz von Anforderungen ausgehend der verschiedenen Fahrzeuge auf einer Montagelinie nicht berücksichtigt. Für eine ganzheitliche Berücksichtigung und Planung von Anlagen müssen diese jeden vorkommenden Prozess bedienen können. In verschiedenen Ansätzen wird zwar eine Varianz der verschiedenen möglichen Montagereihenfolgen beschrieben, so z. B. von (Jonas 2000) durch die Beschreibung der Vorgänger-/ Nachfolger-Beziehung, jedoch erfolgt keine Berücksichtigung einer möglichen Varianz übriger Produkt- und Prozessparameter. Für die Methode dieser Arbeit stellt sich so die folgende Forschungsfrage:

*„Wie kann die Varianz der Anforderungen, ausgehend der Bandbreite an Produkten und Prozessen in der Automobilendmontage, für eine optimale Auswahl einer Ressource dargestellt werden?“*

Nach der Anforderung acht ist die Ähnlichkeit von Produkten und Prozessen herauszustellen, sodass eine Bündelung ähnlicher Produkte und Prozesse in einem Anlagenkonzept vorgenommen werden kann. Mit der Ähnlichkeit von Anforderungen beschäftigten sich u. a. (Smale und Ratchev 2009) und (Obst, Doherr und Urbas 2013). Die Metrik von (Obst, Doherr und Urbas 2013) zur Bestimmung der Ähnlichkeit von Anforderungen stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, jedoch ist ebenso zu untersuchen, welche Attribute im Detail für diese Metrik für das Ziel der Bündelung von Relevanz sind. Die in Kapitel 4.4 beschriebene Methode der Clusteranalyse beschäftigt sich mit der Bestimmung von Ähnlichkeiten und Zusammenfassung ähnlicher Objekte in Gruppen. Es werden verschiedene Verfahren zur Fusionierung von Objekten vorgeschlagen sowie unterschiedliche Arten der Bestimmung des Proximitätsmaßes. Das Ziel der Bündelung mehrerer Produkte und Prozesse besteht darin, den wirtschaftlichen Nutzen der Anlage zu erhöhen. Unähnliche Produkte und Prozesse führen jedoch dazu, dass eine größere Flexibilität von der Ressource gefordert wird. In diesem Kontext gilt es bei der Bestimmung der Ähnlichkeiten als auch bei der Gruppierung bzw. Bündelung die Flexibilität von einzelnen Ressourcen zu berücksichtigen. Für diese Arbeit leitet sich somit zusammengefasst ausgehend der Anforderung acht die folgende Forschungsfrage ab:

*„Welche Ähnlichkeiten von Produkt und Prozess sind für die Bündelung mehrerer Prozesse in einer Ressource entscheidend, unter Berücksichtigung der Flexibilität der Ressource?“*

Bei der Bündelung selbst sind die Auswirkungen auf den wirtschaftlichen Nutzen zu berücksichtigen. Führen unähnliche Produkte und Prozesse zu höheren Anforderungen an die Anlage, so sind i. d. R. komplexere Anlagenkomponenten notwendig. Die durch die Bündelung entstehenden Auswirkungen auf die Ressource sind daher während der fähigkeitsbasierten Planung zu berücksichtigen. Aus der Anforderung acht ergibt sich damit die folgende zweite Forschungsfrage:

*„Wie können die Auswirkungen der Bündelung mehrerer Produkte und Prozesse auf die Ressource während der Zuordnung von PPR berücksichtigt werden?“*

Die Anforderung neun der Mehrfachverwendung von Modulen in verschiedenen Anlagenkonzepten zielt wie auch die Bündelung mehrerer Produkte und Prozesse darauf ab, den wirtschaftlichen Nutzen der Anlagenkonzepte zu erhöhen. Für eine Mehrfachverwendung ist vor allem die örtliche Bündelung von Anlagenkonzepten in der Montagelinie entscheidend. Somit ist die Mehrfachverwendung innerhalb der Prozessplanung der Montagelinie unter Einbeziehung der Anlagenkonzepte vorzunehmen (siehe Anforderung zehn). Methoden der Clusteranalyse aus Kapitel 4.4 lassen sich jedoch nicht direkt auf diese Anforderung übertragen. Ebenso wird eine Mehrfachverwendung in den bestehenden Forschungsansätzen nicht explizit betrachtet. Für diese Arbeit ergibt sich somit die folgende Forschungsfrage ausgehend der Anforderung neun:

*„Wie kann eine Mehrfachverwendung von Modulen in der Automobilendmontage für mehrere Anlagenkonzepte analysiert werden?“*

### **5.4 Zusammenfassung der Forschungsfragen**

Für die Beantwortung der Forschungsfragen und der Konzipierung der Planungsmethode dieser Arbeit sind die einzelnen Handlungsbedarfe mit Hilfe eines Schalenmodells strukturiert worden (siehe Abbildung 26). Die Planungsmethode zielt vor allem auf die Identifikation wiederverwendbarer Module. Daher soll zunächst geklärt werden, wie eine Analyse bzw. Bewertung wiederverwendbarer Module für die Automobilendmontage auszusehen hat. Aufbauend hieraus soll anschließend die Methode für die fähigkeitsbasierte Planung der Wiederverwendungen erarbeitet werden. Die Bearbeitung der Forschungsfragen soll somit von außen nach innen erfolgen. Die Nummerierung der Forschungsfragen leitet sich aus dem Schalenmodell ab.

Zunächst ist innerhalb dieser Arbeit die zentrale Forschungsfrage der Analyse der Wiederverwendbarkeit:

*„Wie kann die Wiederverwendbarkeit von Anlagenmodulen unter Berücksichtigung zukünftiger Situationen des Produktionsumfeldes analysiert werden?“*

zu klären. Hierüber wird definiert, welche Informationen ausgehend der fähigkeitsbasierten Planung notwendig sind. Erst auf Basis dessen kann folgend das Konzept für die fähigkeitsbasierte Planung im Detail ausgearbeitet werden. Im Detail gilt es im Rahmen der Analyse der Wiederverwendbarkeit die folgenden vier Forschungsfragen zu beantworten:

1. *„Wie können die Effektivität und Effizienz der Wiederverwendung von Modulen für die Automobilendmontage analysiert und verglichen werden?“*
2. *„Wie kann das Risiko einer Rekonfiguration von Modulen für verändernde Rahmenbedingungen in der Automobilendmontage analysiert und bewertet werden?“*
3. *„Wie kann ausgehend einer Referenzmenge an Anlagenkonzepten der Wiederverwendungsgrad einzelner Module analysiert und bewertet werden?“*

Für die fähigkeitsbasierte Planung von Wiederverwendungen stellt sich die zentrale Forschungsfrage:

*„Wie kann eine fähigkeitsbasierte Planung der Wiederverwendungen eines Moduls durchgeführt werden, unter Berücksichtigung der Komplexität ausgehend der Produktvarianz und der technologischen Alternativen?“*

Allgemein ist für die fähigkeitsbasierte Planung zunächst eine Modellierung von PPR vorzunehmen, womit es die folgenden drei Forschungsfragen zu beantworten gilt:

4. *„Wie können die Anforderungen ausgehend von Produkten und Prozessen aus der Automobilendmontage in einem Modell dargestellt werden?“*
5. *„Wie kann die Varianz der Anforderungen, ausgehend der Bandbreite an Produkten und Prozessen in der Automobilendmontage, für eine optimale Auswahl einer Ressource dargestellt werden?“*
6. *„Wie können strukturelle Eigenschaften und Rahmenbedingungen der Automobilendmontage sowie die Fähigkeiten von Ressourcen in einem Modell dargestellt werden?“*

Ausgehend der Modellierung von PPRS ist folgend zu klären, auf welchen Ebenen von PPR die Konfiguration und Optimierung von Anlagenkonzepten durchzuführen ist. Daher ist im Anschluss an die Modellierung die folgende Forschungsfrage zu beantworten:

7. *„Auf welcher Ebene von Produkt, Prozess und Ressource ist die Konfiguration und Optimierung von PPR durchzuführen?“*

Während der Konfiguration der Anlagenkonzepte ist zudem eine Bündelung von Produkten und Prozessen in einem Anlagenkonzept vorzunehmen. Ebenso sind während der Bündelung die Auswirkungen der Bündelung auf die Ressource zu berücksichtigen. Hierfür sind die folgenden zwei Forschungsfragen zu beantworten:

8. „Welche Ähnlichkeiten von Produkt und Prozess sind für die Bündelung mehrerer Prozesse in einer Ressource entscheidend, unter Berücksichtigung der Flexibilität der Ressource?“
9. „Wie können die Auswirkungen der Bündelung mehrerer Produkte und Prozesse auf die Ressource während der Zuordnung von PPR berücksichtigt werden?“

Die eigentliche Konfiguration stellt wie zuvor beschrieben ein Zuordnungs- und Optimierungsproblem dar, welches zu der folgenden Forschungsfrage führt:

10. „Wie kann eine Zuordnung und Optimierung von PPR für die Automobilendmontage durchgeführt werden?“

Nachdem mehrere verschiedene Anlagenkonzepte mit Hilfe der fähigkeitsbasierten Planung konfiguriert wurden, ist analog der Anforderung elf eine Prozessplanung der automatisierten Montagelinie vorzunehmen. Hierüber sind Anlagenkonzepte final auszuwählen, die zu einer größtmöglichen Verbesserung des Produktionsumfeldes führen. Zudem sollen die Anlagenkonzepte im letzten Schritt noch einmal optimiert werden. Hierfür ist die zwölfte und letzte Forschungsfrage zu beantworten:

11. „Wie kann eine Mehrfachverwendung von Modulen in der Automobilendmontage für mehrere Anlagenkonzepte analysiert werden?“

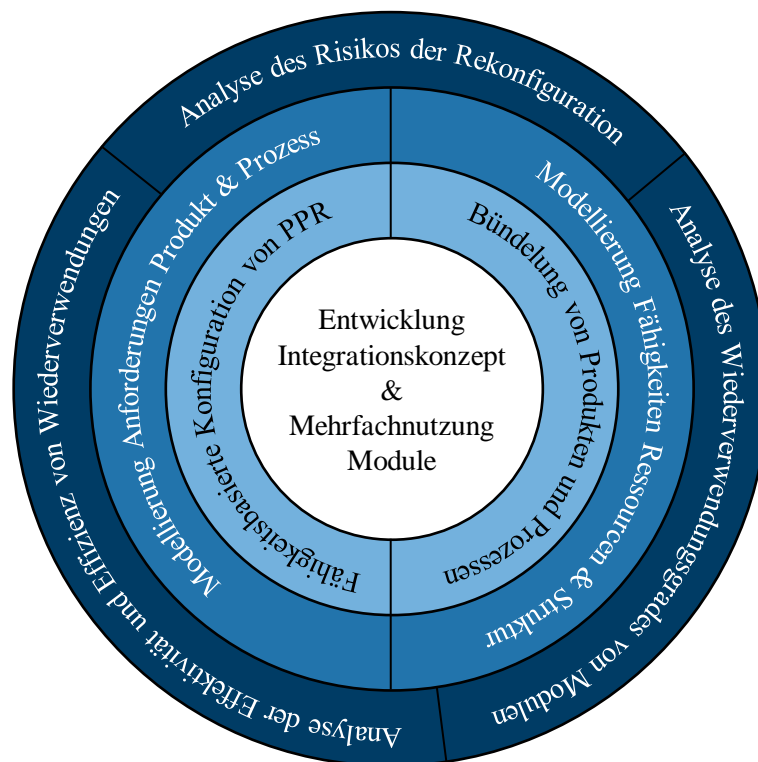


Abbildung 26: Vorgehen zur Beantwortung der Forschungslücken und Konzipierung der Methode



### 6 Lösungskonzept

Durch die Analyse der Anforderungen an die Planungsmethode und der Überprüfung bestehender Ansätze und Methoden wurde deutlich, dass ein Handlungsbedarf hinsichtlich der fähigkeitsbasierten Planung von Wiederverwendungen sowie der Analyse der Wiederverwendbarkeit von Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien, allgemein Modulen, besteht. In diesem Kapitel soll folgend zunächst der Zusammenhang der beiden Themenschwerpunkte mit Hilfe eines Gesamtkonzepts der Planungsmethode dargestellt werden. Dieses leitet sich ausgehend der Kapitel 3.8, 4.1.3 und 4.6 ab. Zudem soll die Planungsmethode in den Prozess des Engineerings von Anlagen nach der (VDI/ VDE 3695) eingeordnet werden. Aufbauend auf dem Lösungskonzept erfolgt anschließend die Beantwortung der Forschungsfragen. Allgemein sind dieses Kapitel sowie die Kapitel 7 und 8 nach dem anwendungsorientierten Forschungsvorgehen nach (Ulrich, Dyllick und Robst 1984) aus Kapitel 1.3 der Ableitung von Beurteilungskriterien, Gestaltungsregeln und –modellen zuzuordnen.

#### 6.1 Gesamtkonzept der Planungsmethode

Die fähigkeitsbasierte Planung sowie die Analyse der Wiederverwendbarkeit sind in die projektunabhängigen Aktivitäten der (VDI/ VDE 3695) einzuordnen (siehe Kapitel 3.8). Im Rahmen der Planungsmethode liegt der Fokus sowohl auf bereits bestehenden Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien, über die bereits Daten und Informationen aus dem Betrieb zur Verfügung stehen, als auch auf Modulen, welche ausschließlich theoretische Konzepte darstellen. Vor allem letztere sind nach dem Vorgehen der (VDI/ VDE 3695) im Anschluss an die Planungsphase zu realisieren und zu testen bzw. zu erproben. Damit in den weiteren Planungsphasen die Effekte der Wiederverwendung effizient genutzt werden können (siehe Kapitel 3.3), sollen die Phasen der Realisierung und des Tests im Gesamtkonzept mit berücksichtigt werden. Im Folgenden werden diese zwei Phasen zusammengefasst als modulatorientierte Qualifizierung bezeichnet. Innerhalb dieser erfolgt die Qualifizierung oder auch serienreife Entwicklung und Erprobung der vorher identifizierten wiederverwendbaren Module. Angelehnt an das Gesamtkonzept (siehe Abbildung 27) werden folgend die einzelnen Schritte beschrieben:

- Modellierung PPRS
- Fähigkeitsbasierte Konfiguration Anlagenkonzepte
- Entwicklung Integrationskonzept
- Analyse Wiederverwendbarkeit
- Modulatorientierte Qualifizierung

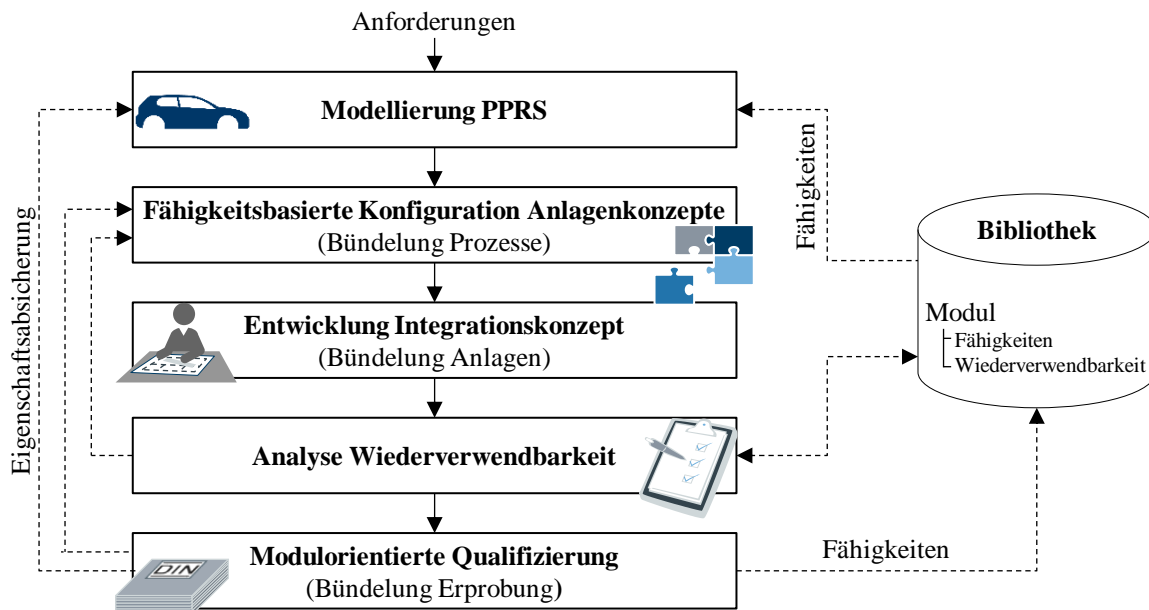


Abbildung 27: Gesamtkonzept der fähigkeitsbasierten Planungsmethode zur Analyse der Wiederverwendbarkeit

### Modellierung PPRS

Die fähigkeitsbasierte Planung von Wiederverwendungen konzentriert sich darauf, ein optimales Anlagenkonzept bestehend aus Produkten, Prozessen und Ressourcen zu konfigurieren. Angelehnt an den PPRS-Ansatz aus Kapitel 4.3, sind hierbei sowohl die Anforderungen der Produkte und Prozesse als auch die Fähigkeiten der Ressourcen zu modellieren. Auf Basis dieser Modellierung kann anschließend im nächsten Schritt untersucht werden, welche Ressourcen passende Fähigkeiten für die gestellten Anforderungen besitzen. Nach Kapitel 4 besteht zudem die Forderung, dass bei der Modellierung der Anforderungen ganzheitlich die Varianz der Montagelinie berücksichtigt wird. Ebenso sind nicht nur die Fähigkeiten der Ressourcen, sondern auch die strukturellen Rahmenbedingungen der Montage zu modellieren und zu berücksichtigen.

Die Automobilendmontage ist wie in Kapitel 2.2 beschrieben in mehrere Montagelinienabschnitte unterteilt, die jeweils verschiedene strukturelle Eigenschaften besitzen können. Dies bedeutet, dass innerhalb der fähigkeitsbasierten Planung jeweils der Fokus auf einem Montagelinienabschnitt bzw. Montagelinienabschnitte mit ähnlichen strukturellen Eigenschaften liegt.

### Fähigkeitsbasierte Konfiguration Anlagenkonzepte

Auf Basis der Modellierung von PPRS erfolgt anschließend eine Zuordnung der Produkt- und Prozessanforderungen und den Ressourcenfähigkeiten, mit dem Ziel, mehrere Anlagenkonzepte zu konfigurieren. Zusätzlich besteht nach Kapitel 4.1.3 die Forderung mehrere Produkte und Prozesse während der Konfiguration in einer Anlage zu bündeln, um so eine hohe Auslastung der Anlage zu erreichen. Um innerhalb der fähigkeitsbasierten Konfiguration

zudem optimale Anlagenkonfigurationen zu generieren, sind Optimierungsalgorithmen einzubeziehen. Hierbei können abhängig des Daten- und Informationsstandes über die Module Kriterien bzgl. deren Wiederverwendbarkeit z. B. über eine Filterung mit einbezogen werden. Innerhalb der Optimierung selbst liegt die Betrachtung vor allem auf der Wirtschaftlichkeit bzw. vereinfacht dem Kosten-Nutzen-Verhältnis, um somit zunächst eine neutrale Bewertung z. B. unabhängig der Qualität oder der technischen Verfügbarkeit zu ermöglichen. Denn diese Informationen sind insbesondere bei theoretischen Konzepten häufig nicht valide und müssen in anschließenden Erprobungen erst noch untersucht werden.

### **Entwicklung Integrationskonzept**

Ausgehend der generierten Anlagenkonzepte ist anschließend wie in Kapitel 4.1 beschrieben der Fokus auf die Prozessplanung des jeweiligen Montagelinienabschnittes unter Einbeziehung der Anlagenkonzepte zu legen. Hierdurch sind die Auswirkungen der Anlagen auf dem Montagelinienabschnitt zu analysieren, und die für die Montage optimalsten Anlagen final auszuwählen. Nach der Forschungsfrage zehn (siehe Kapitel 5.4) ist hierbei zudem eine Optimierung der Anlagenkonzepte durch eine örtliche Bündelung bzw. Mehrfachverwendung von Modulen zu realisieren. Wie auch bei der Konfiguration der Anlagenkonzepte soll die Auswahl der Anlagen ebenfalls anhand des Kosten-Nutzen-Verhältnisses stattfinden. Durch eine zunehmende Referenzmenge an analysierten Modulen können in folgenden Durchläufen ebenfalls Filterungen hinsichtlich der Wiederverwendbarkeit vorgenommen werden. Das Ergebnis dieses Schrittes wird folgend als Integrationskonzept bezeichnet.

### **Analyse der Wiederverwendbarkeit**

Ausgehend des Integrationskonzepts sind die neu konfigurierten Anlagenkonzepte folgend in einer Datenbank abzulegen. Durch wiederholte Durchführung der Methode kann so eine Referenzmenge an wiederverwendbaren Modulen aufgebaut werden. Ausgehend neuer Wiederverwendungen sowie bereits bestehender Wiederverwendungen aus der Datenbank ist die Wiederverwendbarkeit der Module zu analysieren. Für die Analyse der Wiederverwendbarkeit können hierbei verschiedene Hierarchieebenen der Ressourcen (siehe Kapitel 2.2) betrachtet werden.

Abhängig der Wiederverwendbarkeit können Planer folgend bewerten, ob eine Verwendung des Moduls im Projekt sinnvoll ist. Sollte die Wiederverwendbarkeit eines Moduls nicht ausreichen bzw. wird vom Planer als zu gering bewertet, so kann ein erneuter Durchlauf der Methode mit einer vorherigen Filterung des jeweiligen Moduls durchgeführt werden. Wiederholte Anwendungen können ebenfalls zu einer systematischen Steigerung der Wiederverwendung von Modulen führen.

### **Modulorientierte Qualifizierung**

Durch die zuvor beschriebene Planung werden Module mit einer hohen Wiederverwendbarkeit herausgestellt. Diese sind anschließend, vor ihrer Integration in der Automobilendmontage, in Tests zu qualifizieren. Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, stellt die Qualifizierung mehrerer Anlagen bzw. Module einen hohen Aufwand bzgl. Kosten und Zeit dar. Zur Realisierung der Vorteile aus der Wiederverwendung gleicher Module sind ähnliche Erprobungsumfänge in der Qualifizierung zu bündeln. Es ist z. B. ein Modul einmalig für sämtliche seiner möglichen Verwendungszwecke und Funktionen zu erproben, sodass folgend die Aufwände für eine Erprobung reduziert werden können. Mit einer höheren Anzahl an Wiederverwendungen des gleichen Moduls in unterschiedlichen Anlagen stellt sich hierdurch eine steigende Aufwandsminimierung heraus.

Für die Qualifizierung selbst sind zuvor die Abhängigkeiten zwischen den Modulen herauszustellen, um ausgehend dessen die Reihenfolge der zu qualifizierenden Module sowie ganzheitlich die Anforderungen an die Module zu ermitteln. Mit der Qualifizierung sind zudem, analog der Eigenschaftsabsicherung der (VDI 2206), die modellierten Fähigkeiten und Kausalitäten der Module aus der fähigkeitsbasierten Planung zu evaluieren. Für die modulorientierte Qualifizierung kommen agile Methoden wie z. B. das Programm Board (Gustavsson 2018) in Frage. Innerhalb dieser Arbeit wird ein Qualifizierungsplan für die modulorientierte Qualifizierung am Beispiel des Anwendungsfalls in Kapitel 9.4 erstellt.

### **6.2 Einordnung der Methode im Engineering nach der VDI 3695**

In diesem Kapitel soll folgend das vorgestellte Gesamtkonzept in das Vorgehen zum Engineering von Anlagen nach der (VDI/ VDE 3695) eingeordnet werden. Dieses Vorgehen zielt wie in Kapitel 3.2 beschrieben auf die Wiederverwendung von Artefakten im Engineering ab. In Kapitel 3.8 wurde zudem für die Analyse der Wiederverwendbarkeit ein offener Handlungsbedarf identifiziert, welcher mit Hilfe des Gesamtkonzepts folgend adressiert wird. Allgemein wurde die (VDI/ VDE 3695) bereits in mehreren Arbeiten rund um die Wiederverwendung von Modulen aufgegriffen (siehe Kapitel 3.7). In der Abbildung 28 wird die Erweiterung der (VDI/ VDE 3695) von (Jazdi et al. 2010) und (Hell 2018) verwendet und um die Methode dieser Arbeit ergänzt.

Die Planungsmethode dieser Arbeit ist als das Vorgehen der projektunabhängigen Aktivitäten anzusehen (siehe Kapitel 3.8). Das Gesamtkonzept adressiert jedoch eine Grobplanung, weshalb analog der (VDI 2206) weitere Iterationen für eine Feinplanung erforderlich sind. Damit innerhalb der fähigkeitsbasierten Planung ganzheitlich die Wiederverwendungen untersucht werden können, sind die Anforderungen aus den projektabhängigen Aktivitäten notwendig. Konfigurierte Integrations- und Anlagenkonzepte können ausgehend ihrer Wiederverwendbarkeit in der Planungsphase der projektabhängigen Aktivitäten ausgewählt werden. Im Falle von neuen Anforderungen kann zudem die fähigkeitsbasierte Planung erneut für

die spezifischen Anforderungen des Projekts ausgeführt werden. Hierbei ist es zudem möglich, in der fähigkeitsbasierten Planung ausschließlich bereits qualifizierte Module mit einer hohen Wiederverwendbarkeit zu berücksichtigen. Durch dieses Vorgehen können somit passende Integrations- und Anlagenkonzepte für die spezifischen Projektanforderungen generiert und ausgewählt werden.

Für die Realisierung der Anlagen und der Nutzung von Skaleneffekten ist zudem eine gebündelte Beschaffung von Anlagen oder Anlagenkomponenten sinnvoll (Schuh 2012). Hierfür können sich die in der Montagelinie örtlich gebündelte Anlagen als vorteilhaft erweisen, in dem größere Anlagenumfänge mit gleichen oder ähnlichen Umfängen zusammen beschafft und realisiert werden.

Neben der Validierung der Fähigkeiten und Eigenschaften der Module im Rahmen der projektunabhängigen Aktivitäten, sind ebenfalls Daten und Informationen aus dem Betrieb notwendig. Durch eine Rückkopplung dieser Daten und Informationen können folgend die Eigenschaften der Module abgesichert und in anschließenden Planungen berücksichtigt werden. Allgemein ist für die Realisierung des Vorgehens aus der Abbildung 28 ein durchgängiges Datenmanagement notwendig. Dieses wird jedoch nicht im Rahmen dieser Arbeit thematisiert und ist in folgenden Forschungsarbeiten zu adressieren. Nach der (VDI/ VDE 3695) stellt das Vorgehen somit den Zielzustand D dar, bei dem die Wiederverwendung anhand von Referenzmodellen betrieben wird und wiederverwendbare Einheiten abgeleitet werden (siehe Kapitel 3.2).

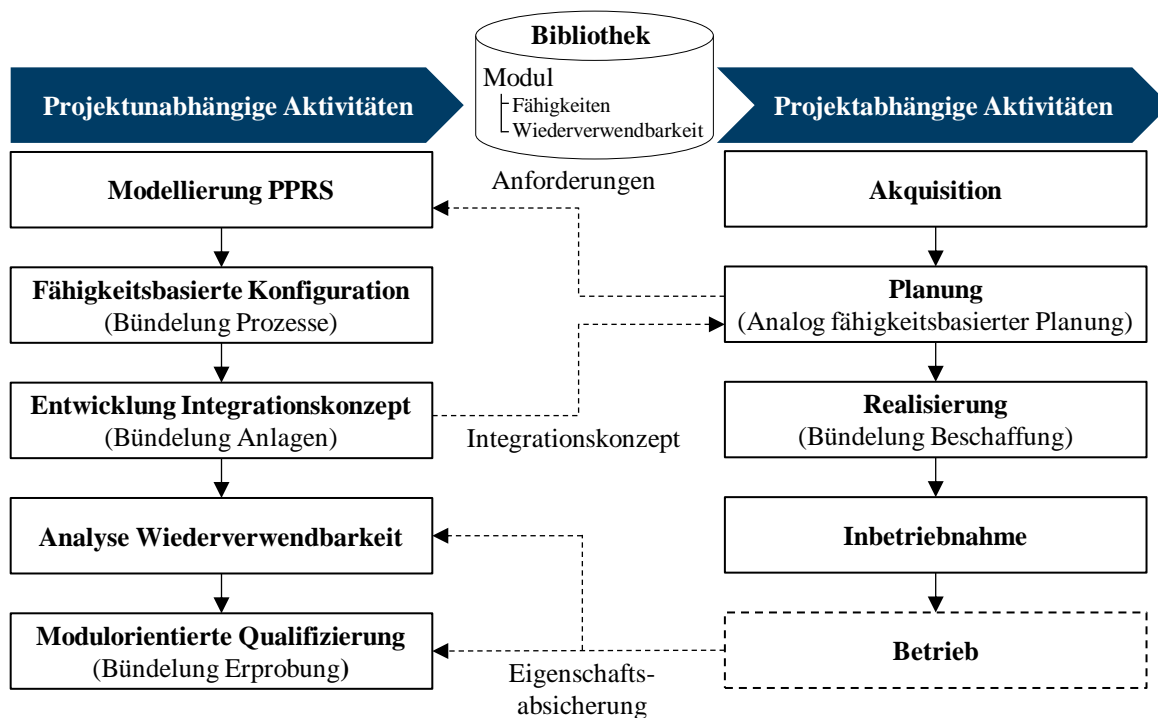


Abbildung 28: Einordnung der Planungsmethode ins Engineering (in Anlehnung an VDI/ VDE 3695, Jazdi et al. 2010, Hell 2018)

## 7 Analyse der Wiederverwendbarkeit

In diesem Kapitel wird, analog des in Kapitel 5.4 abgeleiteten Forschungsvorgehens, zunächst die äußerste Ebene des Schalenmodells thematisiert (siehe Abbildung 29). Die Methode zur Analyse der Wiederverwendbarkeit dient anschließend als Grundlage für die weitere Ausarbeitung der fähigkeitsbasierten Planung. Zusammengefasst adressiert dieses Kapitel somit die Beantwortung der folgenden Forschungsfragen:

1. „Wie können die Effektivität und Effizienz der Wiederverwendung von Modulen für die Automobilendmontage analysiert und verglichen werden?“
2. „Wie kann das Risiko einer Rekonfiguration von Modulen für verändernde Rahmenbedingungen in der Automobilendmontage analysiert und bewertet werden?“
3. „Wie kann ausgehend einer Referenzmenge an Anlagenkonzepten der Wiederverwendungsgrad einzelner Module analysiert und bewertet werden?“

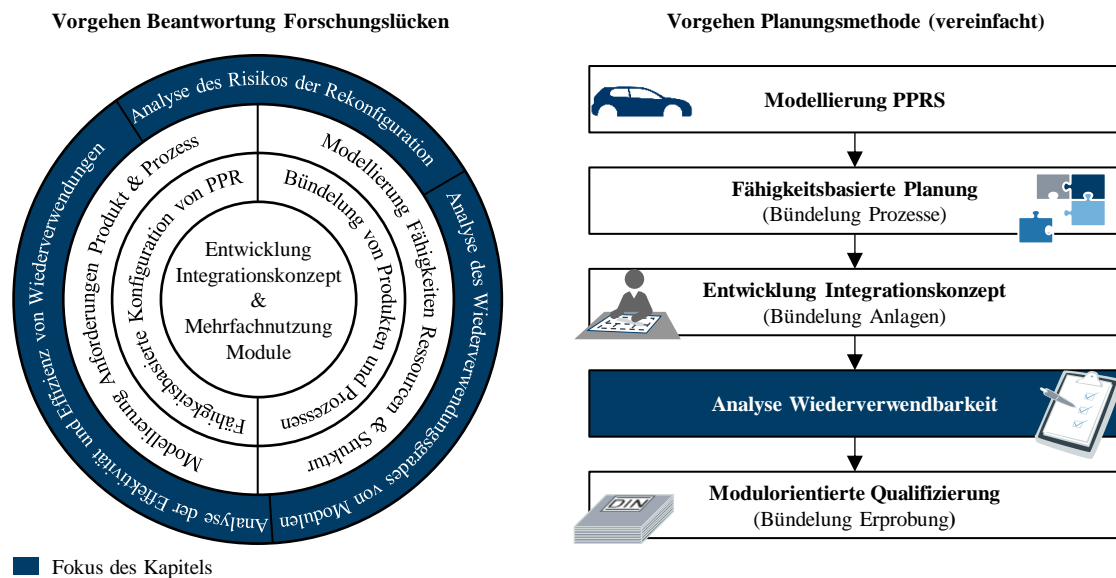


Abbildung 29: Einordnung des Kapitels 7 in den Forschungskontext und das Gesamtkonzept

### 7.1 Kriterien zur Bewertung der Wiederverwendbarkeit

Zur Herleitung der Kriterien für die Bewertung der Wiederverwendbarkeit werden zunächst die Anforderungen untersucht, die allgemein an Module innerhalb der Automobilendmontage gestellt werden. Ausgehend dieser Anforderungen werden folgend allgemeingültige Kriterien abgeleitet, mit Hilfe derer die Effektivität und Effizienz der Wiederverwendbarkeit bewertet werden kann.

Neben den Kriterien ist die Modulebene für die Bewertung der Wiederverwendbarkeit entscheidend. Die hohe Wiederverwendbarkeit kleinerer Ressourcen steht dem Nutzen der Wiederverwendung komplexer Ressourcen gegenüber (Weyrich und Klein 2012a, Weyrich und Klein 2012b). Dies wird ebenfalls in (Biffel, Lüder und Gerhard 2017, Hell 2018) deutlich,

in denen wiederverwendbare Artefakte abhängig der Ebenen des Produktionssystems untersucht wurden. Hierzu schreibt (Elger und Haußner 2010) zudem:

*„Die Festlegung der Granularität eines mechatronischen Moduls ist hierbei variabel möglich und hängt von der Aufgabenstellung und dem sinnvollen Grad der Wiederverwendung ab.“ (Elger und Haußner 2010)*

(Elger und Haußner 2010) betrachtet bei der Definition wiederverwendbarer Module ebenfalls weniger singulär eine Ebene sondern viel mehr variabel verschiedene Ebenen mit Ressourcen unterschiedlicher Komplexität. Eine starre Eingrenzung auf eine spezifische Ebene erfolgt im Rahmen dieser Arbeit nicht, womit dem Anwender der Methode die Möglichkeit geboten wird die optimale Ebene wiederverwendbarer Module zu identifizieren.

### **7.1.1 Anforderungen an Module der Automobilendmontage**

Für die Bestimmung der Anforderungen an Module innerhalb der Automobilendmontage wurden die verschiedenen Lebensphasen eines Moduls betrachtet sowie die Verwendungen, Interaktionen und Schnittstellen des Moduls untersucht. Hieraus hat sich ergeben, dass eine grobe Gliederung der Anforderungen in die Kategorien Struktur, Produkt und Prozess, Allgemein, Module und Mensch möglich ist (siehe Abbildung 30). Zusammen mit Domain Experten der Disziplinen Prozessplanung, Anlagenplanung, Instandhaltung, Qualität sowie Simulations- und Datenbanksysteme sind Anforderungen an die jeweiligen Kategorien definiert. Ebenso sind die von (Stallinger et al. 2011) definierten Kriterien zur Hilfe genommen und bzgl. ihrer Relevanz für die Automobilendmontage überprüft worden. Wie in Kapitel 1.1 und Kapitel 3.5.1 beschrieben, besteht zunehmend die Forderung nach wandlungsfähigen Anlagen. (Nyhuis, Wiendahl und Reichardt 2009) unterteilt die Wandlungsfähigkeit weiter in die fünf Wandlungsbefähiger Modularität, Universalität, Kompatibilität, Skalierbarkeit und Mobilität. Bezogen auf Anforderungen an Module für die Automobilendmontage sind diese Wandlungsbefähiger ebenfalls berücksichtigt.

Auf Basis der Erfahrungen der Domain Experten aus der Qualifizierung und Umsetzung verschiedener Anlagen in der Automobilendmontage konnten die in Abbildung 30 aufgeführten Anforderungen bestimmt werden. Mit neuen Technologien und weiteren Umsetzungen von Anlagen sind die Anforderungen jedoch weiterhin zu hinterfragen und ggf. zu ergänzen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die definierten Anforderungen als erste Ausgangsbasis verwendet und im Folgenden näher beschrieben.

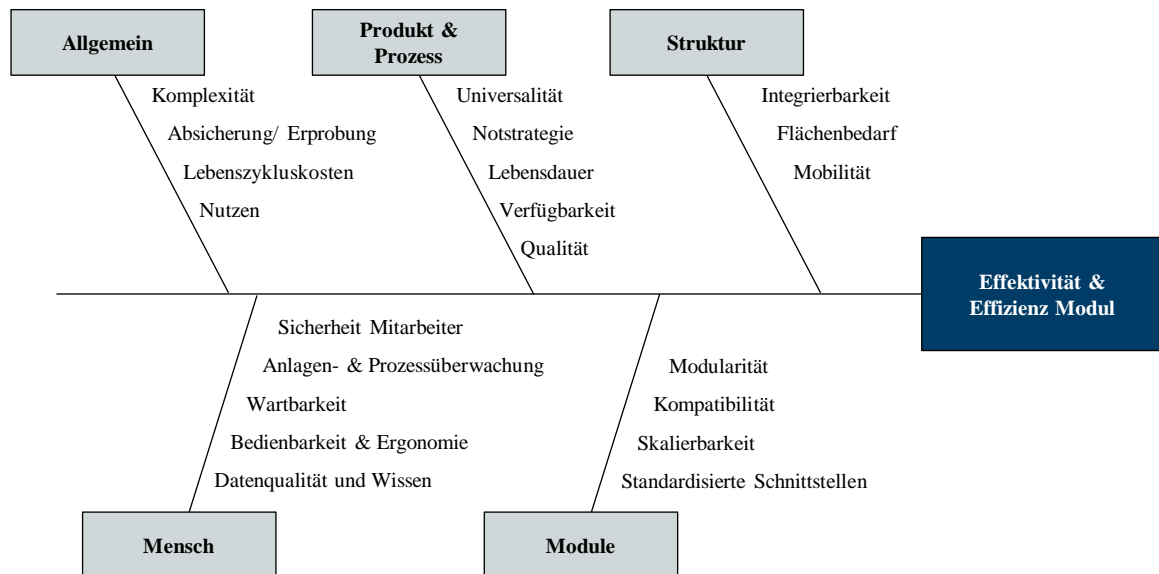


Abbildung 30: Anforderungen an Module innerhalb der Automobilendmontage

### Anforderungen Kategorie Allgemein

Aus der Kategorie der allgemeinen Anforderungen sind vor allem wirtschaftliche Aspekte aufgeführt. Ein Modul soll so einerseits geringe Lebenszykluskosten besitzen und andererseits einen hohen Nutzen aufweisen. Der Nutzen des Moduls kann über verschiedene Ansätze ermittelt werden. Die Lebenszykluskosten spezifisch für die Automobilendmontage sowie der Ansatz zur Ermittlung des Nutzens der Automatisierung werden in Kapitel 7.4 erläutert. Weitere Anforderungen der Kategorie sind, dass Module eine geringe Komplexität besitzen und vor der Nutzung versuchstechnisch abgesichert bzw. erprobt wurden (siehe Kapitel 6.1).

### Anforderungen Kategorie Modul

Die Kategorie Modul beinhaltet in Anlehnung an (Nyhuis, Wiendahl und Reichardt 2009) die Wandlungsbefähiger Modularität, Kompatibilität und Skalierbarkeit. Zusätzlich werden standardisierte mechanische und elektrische Schnittstellen gefordert. Sowohl Modularität als auch standardisierte Schnittstellen sind, wie in Kapitel 3.4 beschrieben, zu erfüllende Voraussetzungen. Die Kompatibilität eines Moduls bezieht sich dabei nicht nur auf die Vernetzungsfähigkeit wie in (Nyhuis, Wiendahl und Reichardt 2009) beschrieben, sondern ebenfalls darauf, ob Module ausgehend ihrer technischen Eigenschaften und Fähigkeiten miteinander kombiniert werden können. Ein Roboter muss so z. B. eine ausreichende Traglast für das Gewicht des Endeffektors besitzen. Unter der Skalierbarkeit wird, wie auch in (Nyhuis, Wiendahl und Reichardt 2009), die Erweiter- und Reduzierbarkeit des Moduls verstanden, um abhängig der Verwendungen ein Modul in seiner Komplexität und seinem Funktionsumfang anpassen zu können, ähnlich des Plug & Produce Ansatzes (siehe (Reinhart 2017)).



### **Anforderungen Kategorie Struktur**

Innerhalb der Kategorie Struktur werden Anforderungen wie eine hohe Integrierbarkeit, ein geringer Flächenbedarf und eine hohe Mobilität gefordert. Die Integrierbarkeit des Moduls in neue oder bestehende Montagelinien bezieht sich darauf, ob ein Modul für die strukturellen Rahmenbedingungen wie z. B. der Fördertechnik kompatibel ist. Ebenso wird ein geringer Flächenbedarf des Moduls gefordert, damit durch die Automatisierung von Prozessen keine zusätzlichen Montagetakte erforderlich sind und Module auch in strukturell engen Brownfield Montagelinien eingesetzt werden können. Ausgehend der ggf. erforderlichen Neupositionierungen von Modulen in der Struktur der Montagelinie wird zudem gefordert, dass Module eine Mobilität besitzen. Nach (Nyhuis, Wiendahl und Reichardt 2009) beschreibt diese, die „örtlich uneingeschränkte Bewegbarkeit von Objekten“. Bezogen auf den Anwendungsfall der Montage sollen Module möglichst schnell und ohne große Aufwände in der Struktur verschoben werden können.

### **Anforderungen Kategorie Produkt und Prozess**

In der Kategorie Produkt und Prozess wird vor allem eine Universalität, also eine Dimensionierung und Gestaltung des Moduls für möglichst viele verschiedene Produkt- und Prozessanforderungen, gefordert. Wie in Kapitel 1.1 beschrieben, entsteht vor allem in der Automobilendmontage aufgrund der hohen Anzahl an Ausstattungsvarianten als auch der Montage mehrerer Modelle auf einer Montagelinie eine hohe Varianz. Die Universalität von Modulen ist somit eine wichtige Anforderung für die Automatisierung. Weitere Anforderungen beziehen sich auf die Lebensdauer, Qualität und Verfügbarkeit des Moduls für den jeweiligen Prozess. Ebenso ist eine Notstrategie erforderlich, um auch bei Störungen des Moduls die Verfügbarkeit des jeweiligen Montagelinienabschnittes gewährleisten zu können. Die Notstrategie ist zumeist abhängig vom automatisierten Prozess. Wird ein einfacher Fügeprozess automatisiert, so kann in der Notstrategie der Prozess manuell oder ggf. mit einem manuellen Handwerkzeug durchgeführt werden. Handelt es sich jedoch um die Handhabung eines komplexen Bauteils wie z. B. dem des Cockpits, ist als Notstrategie mindestens ein Manipulator für den manuellen Verbau vorzusehen.

### **Anforderungen Kategorie Mensch**

Die letzte Kategorie Mensch beinhaltet Anforderungen, die für die Interaktion zwischen Mensch und Modul in den einzelnen Lebensphasen benötigt werden. Im Engineering und der Rekonfiguration sind so Daten, Informationen und Wissen über Eigenschaften und Verhalten des Moduls notwendig. Für die Nutzung des Moduls ist zudem eine gute Bedienbarkeit und für die Wartung eine gute Wartbarkeit gefordert. Außerdem wird im Zuge der Industrie 4.0 gefordert, dass Module eine Prozessüberwachung besitzen (Reinhart 2017). Ebenso ist stets Voraussetzung während der Nutzung des Moduls, dass eine ausreichende Sicherheit des Mitarbeiters nach dem aktuellen Stand der Technik gegeben ist (MASCHINENRICHTLINIE 2006/42/EG).

### 7.1.2 Herleitung von Wiederverwendungskriterien

Die in Kapitel 7.1.1 identifizierten Anforderungen an Module der Automobilendmontage wirken sich zum Teil unterschiedlich stark auf die Wiederverwendbarkeit der Module aus. Eine gering erfüllte Anforderung ergibt jedoch nicht immer einen Rückschluss darüber, ob dies tatsächlich Folgen auf die effektive Wiederverwendbarkeit hat. So kann z. B. auch bei einem hohen Flächenbedarf eines Moduls eine Wiederverwendung in zahlreichen Projekten möglich sein. Für eine Bewertung der Effizienz und Effektivität der Wiederverwendbarkeit sind daher eindeutige und allgemeingültige Kriterien zu definieren, mit Hilfe derer gleichzeitig die Anforderungen aus Kapitel 7.1.1 Berücksichtigung finden. In der Tabelle 5 sind hierfür die Kriterien ermittelt, auf welche die Anforderungen primär einen Einfluss besitzen. Insgesamt haben sich hierbei die folgenden sechs Kriterien herausgestellt, mit denen ganzheitlich die Wiederverwendbarkeit von Modulen der Automobilendmontage bewertet werden kann. Zusätzlich zu diesen konnten Voraussetzungen identifiziert werden, die vor der Wiederverwendung zu erfüllen sind. Wie auch in (Gepp, Vollmar und Schaeffler 2014) beschrieben, müssen Module so eine Modularität und standardisierte Schnittstellen besitzen. Außerdem müssen Module nach der (MASCHINENRICHTLINIE 2006/42/EG) aktuelle Sicherheitsstandards erfüllen und so eine ausreichende Sicherheit gegenüber dem Mitarbeiter besitzen. Zusammengefasst sind Voraussetzungen so: Modularität, standardisierte Schnittstellen und Sicherheit gegenüber dem Mitarbeiter.

#### **Wiederverwendungshäufigkeit**

Anforderungen wie Kompatibilität, Skalierbarkeit, Flächenbedarf, Integrierbarkeit und Universalität haben alle indirekt einen Einfluss auf die Wiederverwendungshäufigkeit. Sollte eine gering erfüllte Anforderung einen Einfluss auf die Wiederverwendbarkeit besitzen, kann dies explizit über die Wiederverwendungshäufigkeit des Moduls gemessen werden. Die Ermittlung der Wiederverwendungshäufigkeit erfordert jedoch, dass sowohl ein Anlagenkonzept für spezifische Produkte und Prozesse entwickelt als auch eine Prozessplanung der Montagelinie unter Einbeziehung der Anlage im Vorfeld durchgeführt wurde. Erst hierdurch wird klar, ob eine Wiederverwendung technisch möglich ist (siehe Kapitel 4.1.3). Die Ermittlung der Wiederverwendungshäufigkeit soll im Rahmen dieser Arbeit auf Basis der fähigkeitsbasierten Planung erfolgen.

#### **Kosten-Nutzen-Verhältnis**

Neben technischen sind ebenfalls wirtschaftliche Aspekte bei der Wiederverwendung zu beachten. Vereinfacht kann die Wirtschaftlichkeit effektiver Module über das Kosten-Nutzen-Verhältnis ausgegeben werden. Anforderungen wie die Lebenszykluskosten oder der Nutzen besitzen einen direkten Einfluss auf dieses Verhältnis. Hingegen wirken sich Anforderungen wie Komplexität, Absicherung/ Erprobung, Notstrategie oder auch die Lebensdauer indirekt auf dieses Verhältnis aus. Sind Module noch nicht versuchstechnisch erprobt, so fallen für die Erprobung Kosten an, die zur ganzheitlichen Betrachtung zu berücksichtigen sind.

Ebenso führt eine geringe Lebensdauer eines Moduls zu zusätzlichen Kosten für Reparaturen oder Ersatzteile. In erweiterter Betrachtung sind die Gesamtkosten im Lebenszyklus bezogen auf die Anlage analog des TCO (Total Cost of Ownership) Ansatzes (siehe (Zapf et al. 2020)) zu berücksichtigen.

Speziell bei der Wiederverwendung von Modulen können, neben dem physischen Modul selbst, Artefakte wie z. B.:

- CAD-Daten,
- Dokumentationen,
- Software und
- Informationen & Wissen aus Tests und Betrieb

wiederverwendet werden. Abhängig der Komplexität des Moduls als auch des Wiederverwendungsanteils eines jeden Artefakts, können durch die Wiederverwendung Kosten eingespart werden. (Biffel, Lüder und Gerhard 2017) und (Hell 2018) zeigen hierfür bereits welche Artefakte abhängig welcher Ebene einer Ressource wiederverwendet werden können. Um folgend die Effektivität und Effizienz der Wiederverwendung zu analysieren, sind diese potentiellen Kosteneinsparungen zu ermitteln und zu berücksichtigen. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis inklusive der potentiellen Kosteneffekte wird in Kapitel 7.4 thematisiert.

### **Effektivität des Moduls**

Angelehnt an die OEE nach (REFA 2022) können Anforderungen wie Qualität (Q) und Verfügbarkeit (V) zusammengefasst als die Effektivität des effektiven Moduls beschrieben werden. Die OEE beinhaltet zusätzlich den Leistungsgrad einer Anlage. Bezogen auf die Automobilendmontage ist dieser zu vernachlässigen, da die Leistung von der Taktzeit der Montagelinie vorgegeben wird und jedes effektive Modul entsprechend dieser ausgelegt werden muss. Indirekt einen Einfluss auf die Verfügbarkeit des Moduls und damit auch auf die Effektivität hat zudem die Wartbarkeit. Lassen sich Wartungen oder Reparaturen schneller durchführen, können auch Ausfall- bzw. Störungszeiten reduziert werden. Die Effektivität eines Moduls ( $E_M$ ) ergibt sich so aus (1).

$$E_M = V \cdot Q \tag{1}$$

Bezogen auf Module geringerer Komplexität ist es häufig schwierig die Qualität einem einzelnen Modul zuzuordnen. Daher ist für die Bewertung der Wiederverwendbarkeit kleinerer Module die technische Verfügbarkeit als Maß der Effektivität zu verwenden.

### **Effektivitätsfaktor Montagelinienabschnitt**

Neben der Effektivität des Moduls selbst können Module abhängig ihrer Eigenschaften und Notstrategie im Falle eines Ausfalls bzw. einer Störung den Montagelinienabschnitt zum

Stillstand zwingen. Eine Notstrategie mit einer verzögerten Aufnahme des Montageprozesses kann so im Falle einer Störung bereits zu kurzen Stillständen des Montagelinienabschnittes führen. Ebenso können nicht immer alle Nacharbeiten der im Montageabschnitt entstandenen Prozessfehler oder Mängel noch im selbigen Montageabschnitt behoben werden. Diese Nacharbeiten als auch der vom Modul verursachte Ausschuss sind mit Hilfe eines Effektivitätsfaktors bezogen auf den Montagelinienabschnitt zu berücksichtigen. Dieser Faktor wird vor allem dann von höherer Bedeutung, wenn mehrere gleiche Module in einem Montagelinienabschnitt integriert werden und die Effektivität des Montagelinienabschnittes reduzieren. Der Effektivitätsfaktor des Montagelinienabschnittes ( $E_{MA}$ ) ergibt sich so aus der vom Modul reduzierten Verfügbarkeit des Montagelinienabschnittes ( $V_{MA}$ ) und der nicht behobenen Nacharbeit bzw. dem Ausschuss ausgehend des Moduls ( $Q_{MA}$ ) nach (2).

$$E_{MA} = V_{MA} \cdot Q_{MA} \quad (2)$$

Wie auch die Effektivität des Moduls kann der Effektivitätsfaktor kleineren Modulen häufig nicht eindeutig zugeordnet werden. Im Falle der Bewertung kleinerer Module ist dieses Kriterium daher ggf. außen vorzulassen.

### **Mensch-Maschine Faktor**

Die Anforderungen Datenqualität und Wissen der Kategorie Mensch beziehen sich auf die Einfachheit des Engineerings und der Wiederverwendung des Moduls. Umso mehr Daten, Informationen und Wissen z. B. über das Modul für den Planer zur Verfügung stehen, desto einfacher kann dieses auch von neuen Planern wiederverwendet werden. Zudem lässt sich das Engineering hierdurch hinsichtlich Kosten, Qualität und Zeit optimieren. Weitere Anforderungen der Kategorie Mensch beziehen sich speziell auf die Nutzung und Wartung des Moduls. Anforderungen wie Wartbarkeit, Bedienbarkeit oder auch Prozessüberwachung sind essentielle Anforderungen an Module, die auch bei der Wiederverwendung berücksichtigt werden müssen. Alle Anforderungen die eine Interaktion mit dem Menschen beinhalten lassen sich nur schwer quantitativ bewerten und sollen daher qualitativ mit Hilfe eines multikriteriellen Faktors, folgend „Mensch-Maschine Faktor“ genannt, berücksichtigt werden. Die genaue Ermittlung und Zusammensetzung des Mensch-Maschine Faktors wird in Kapitel 7.3 thematisiert.

### **Risiko der Rekonfiguration**

Während der Nutzung eines Moduls kann es zu Änderungen des Produktionsumfeldes kommen und damit zu neuen Anforderungen an das jeweilige Modul (siehe Kapitel 3.5). Die Wiederverwendbarkeit von Modulen stellt somit ein probabilistisches Maß dar (Ko, Hu und Huang 2005). Eine ganzheitliche Bewertung erfordert, dass die Eignung des Moduls auch für die zukünftigen Situationen des Produktionsumfeldes geprüft wird. Im Detail sind Ein-

trittswahrscheinlichkeiten neuer Anforderungen sowie der daraus resultierenden Rekonfigurationsaufwand des Moduls zu bestimmen. Allgemein kann dies auch als Risiko einer Rekonfiguration bezeichnet werden, wie in Kapitel 3.5.2 definiert. Einen indirekten Einfluss auf dieses Risiko haben vor allem die Anforderungen ausgehend der Wandlungsfähigkeit. Je wandlungsfähiger ein Modul ist, desto einfacher kann dieses auch auf neue Anforderungen angepasst werden. Die genaue Ermittlung des Risikos der Rekonfiguration wird folgend in Kapitel 7.2 thematisiert.

Zusammengefasst adressiert die Tabelle 5 die Beantwortung der Forschungsfrage eins. Mit Hilfe der Kriterien gilt es die Effektivität und Effizienz von Wiederverwendungen eines Moduls zu bewerten. Die Kriterien stellen sich hierbei zum Teil abhängig der Ebene des Moduls heraus.

Tabelle 5: Kriterien zur Analyse der Effektivität und Effizienz der Wiederverwendung von Modulen

| Kategorie         | Anforderungen                  | Erfdl. Bedingung | Wiederverwendungshäufigkeit | Kosten-Nutzen Verhältnis | Effektivität Modul | Effektivität Montagelinienabschnitt | Mensch-Maschine Faktor | Risiko Rekonfiguration |
|-------------------|--------------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|------------------------|------------------------|
| Allgemein         | Komplexität                    |                  |                             | X                        |                    |                                     |                        |                        |
|                   | Absicherung/ Erprobung         |                  |                             | X                        |                    |                                     |                        |                        |
|                   | Lebenszykluskosten             |                  |                             | X                        |                    |                                     |                        |                        |
|                   | Nutzen                         |                  |                             | X                        |                    |                                     |                        |                        |
| Modul             | Modularität                    | X                |                             |                          |                    |                                     |                        |                        |
|                   | Kompatibilität                 |                  | X                           |                          |                    |                                     |                        | X                      |
|                   | Skalierbarkeit                 |                  | X                           |                          |                    |                                     |                        | X                      |
|                   | Standardisierte Schnittstellen | X                |                             |                          |                    |                                     |                        |                        |
| Struktur          | Integrierbarkeit               |                  | X                           |                          |                    |                                     |                        | X                      |
|                   | Flächenbedarf                  |                  | X                           |                          |                    |                                     |                        | X                      |
|                   | Mobilität                      |                  |                             | X                        |                    |                                     |                        | X                      |
| Produkt & Prozess | Universalität                  |                  | X                           |                          |                    |                                     |                        | X                      |
|                   | Notstrategie                   |                  |                             | X                        | X                  | X                                   |                        |                        |
|                   | Lebensdauer                    |                  |                             | X                        |                    |                                     |                        |                        |
|                   | Verfügbarkeit                  |                  |                             |                          | X                  | X                                   |                        |                        |
|                   | Qualität                       |                  |                             |                          | X                  | X                                   |                        |                        |
| Mensch            | Sicherheit Mitarbeiter         | X                |                             |                          |                    |                                     |                        |                        |
|                   | Anlagen- & Prozessüberwachung  |                  |                             |                          |                    |                                     | X                      |                        |
|                   | Wartbarkeit                    |                  |                             |                          | X                  |                                     | X                      |                        |
|                   | Bedienbarkeit & Ergonomie      |                  |                             |                          |                    |                                     | X                      |                        |
|                   | Datenqualität und Wissen       |                  |                             |                          |                    |                                     | X                      |                        |

### 7.2 Risiko der Rekonfiguration von Modulen

Die Automobilendmontage stellt wie in Kapitel 1 beschrieben ein volatiles Umfeld dar, in dem sich die Rahmenbedingungen der Montage stetig ändern können. Die fähigkeitsbasierte Planung der Wiederverwendungen soll jedoch nur für die zum Zeitpunkt der Planung bekannte Situation der Montage durchgeführt werden. Denn auch nur für diese Situation sind Anforderungen an die Module im Detail bekannt. Um folgend ganzheitlich die Wiederverwendbarkeit von Modulen der einzelnen Ressourcenebenen bewerten zu können, ist die Eignung der Module, entsprechend der Forschungsfrage zwei, auch für zukünftige Situationen der Montage innerhalb der Lebensphase der Module zu analysieren. Die einzelnen Situationen können dabei auch als Szenario beschrieben werden. Nach (Gausemeier, Fink und Schlake 1998) stellt ein Szenario eine auf Einflussfaktoren basierend allgemein verständliche Beschreibung einer möglichen zukünftigen Situation dar. Mit der Analyse der Szenarien ist auch das Risiko einer Rekonfiguration zu ermitteln. Als Risiko wird nach (Brühwiler 2001) eine nach der Eintrittserwartung und Auswirkung bewertete und konkrete Bedrohung eines Systems beschrieben. In Kapitel 3.6 sind hierzu eine Reihe von Methoden zur Risikoidentifikation und –bewertung aufgeführt. Aufgrund des evolutionären Entwicklungsprozesses der Fahrzeuge in der Automobilindustrie (siehe Kapitel 3.5.2) ist im Rahmen der Risikobewertung eine qualitative Methode zu bevorzugen. Innerhalb dieser Arbeit ist speziell die Szenarioanalyse gewählt, da diese die Problemstellung der Identifikation und Bewertung des Risikos der Rekonfiguration in mehrere Arbeitsschritte strukturiert. Zudem ermöglicht die Szenarioanalyse eine ganzheitliche Analyse und Prognose der Wirkungszusammenhänge zwischen mehreren Risikoursachen und deren Wirkungen (Mikus 2001). Für die Analyse der Einflussfaktoren und der Entwicklung von Szenarien beschreiben (Gausemeier, Fink und Schlake 1998) und (Kosow et al. 2008) eine Vorgehensweise unterteilt in die fünf Schritte: Szenariofeld-Bestimmung, Schlüsselfaktor Identifikation, Schlüsselfaktor Analyse, Szenario Generierung und Szenario Transfer. Angelehnt an diesen werden folgend zunächst die Arten von Rekonfigurationen, die Abhängigkeiten zwischen Modulen und Anforderungen, der Rekonfigurationsaufwand und die Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenarios bestimmt.

#### Arten der Rekonfiguration

Für die Szenariofeld-Bestimmung ist zunächst untersucht, welche Arten von Rekonfigurationen eintreten können (siehe Abbildung 31). Ausgehend des neuen Szenarios des Produktionsumfeldes kann der Fall eintreten, dass Module ausgetauscht, neue hinzugefügt oder alte entfernt werden müssen. Dies ist immer dann notwendig, wenn der Fähigkeitskorridor und die Flexibilität des Moduls nicht mehr ausreichen, um die Anforderungen der neuen Szenarien zu erfüllen. Besitzt ein neues Fahrzeug oder führt eine Produktänderung am Fahrzeug dazu, dass z. B. das neue Drehmoment eines Schraubprozesses das maximale Drehmoment des Schraubers übersteigt, so muss zur Anpassung des Fähigkeitskorridors der Schrauber entfernt und ein neuer, passender Schrauber hinzugefügt werden. Ändert sich jedoch das

Drehmoment im neuen Szenario innerhalb des möglichen Fähigkeitskorridors des Schraubers, so ist einzig eine Anpassung des Schraubprogramms erforderlich. Insgesamt kann so zwischen zwei Arten der Rekonfiguration unterschieden werden. Diese werden in (ElMaraghy 2005) u. a. auch als „harte“ und „weiche“ Rekonfigurationen definiert (siehe Kapitel 3.5.1):

- **Rekonfiguration durch Hinzufügen bzw. Entfernen von Modulen:** Der Fähigkeitskorridor des Moduls wird überschritten und muss durch Hinzufügen bzw. Entfernen von Modulen angepasst werden. Der Rekonfigurationsaufwand generiert sich aus den einzelnen Aufwänden für Mechanik, Elektrik und Software des Moduls.
- **Rekonfiguration durch Anpassung des Moduls:** Die Anforderungen ändern sich innerhalb des Fähigkeitskorridors bzw. der Flexibilität des Moduls, womit ein Hinzufügen oder Entfernen von Modulen nicht notwendig ist. Der Rekonfigurationsaufwand generiert sich durch die Anpassung der Software des Moduls.

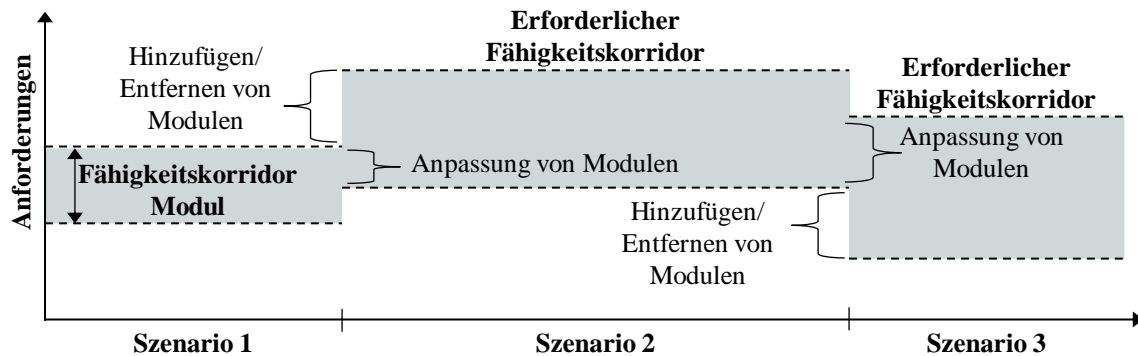


Abbildung 31: Arten der Rekonfiguration von Modulen

### Analyse der Abhängigkeiten zwischen Modulen und Attributen

Um die Anforderungen der neuen Szenarien zu bestimmen, sind diese Anforderungen bzw. Attribute die sich zwischen den Szenarien ändern können zu identifizieren. Dieser Schritt entspricht der Schlüsselfaktor Identifikation der Szenarioanalyse. Szenarien können sich bezogen auf die Automobilendmontage vor allem hinsichtlich der folgenden Attribute unterscheiden:

- **Attribute Produkt & Prozess:** Neue Fahrzeuge auf der Montagelinie oder eine Anpassung der bestehenden Fahrzeuge führt zu neuen Anforderungen von dem Produkt und/ oder Prozess auf das Modul.
- **Attribute Struktur:** Änderungen des Prozessplans oder neue Fahrzeuge auf der Montagelinie können eine Neupositionierung des Moduls zur Folge haben. Neue Positionen in der Struktur können gleichzeitig zu neuen Anforderungen an das Modul führen.

Speziell für Schraubprozesse werden hierfür in Kapitel 8.1 Attribute von Produkten und Prozessen untersucht, die einen Einfluss auf die Auswahl des Moduls haben. Zusätzlich werden Attribute der Montagelinie und des Montagelinienabschnittes analysiert, die ebenfalls die Auswahl von Modulen beeinflussen. Diese produkt-, prozess- und strukturbezogenen Attribute sind folgend für die Identifikation und Bewertung des Risikos der Rekonfiguration zu berücksichtigen.

In den nächsten Schritten sind die Attribute im Detail zu analysieren und der Rekonfigurationsaufwand sowie die Eintrittswahrscheinlichkeit der Rekonfiguration zu bewerten. Dazu sind als erstes Module und deren Abhängigkeiten zu den Attributen zu untersuchen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Abhängigkeiten innerhalb der Modellierung von PPRS für die fähigkeitsbasierte Planung der Wiederverwendung in Kapitel 8.1 analysiert. Es wird bei der Analyse der Attribute & Abhängigkeiten empfohlen Ursachen-Wirkungs-Diagramme zu verwenden. Denn mit Hilfe derer können die Rekonfigurationen (Wirkungen) in Abhängigkeit der Attribute (Ursachen) für ein jedes Modul systematisch untersucht werden.

### **Analyse des Rekonfigurationsaufwandes**

Unterteilt nach den zwei verschiedenen Arten der Rekonfiguration kann anschließend mit Hilfe der Abhängigkeiten zwischen Modulen und Attributen der theoretische Rekonfigurationsaufwand ermittelt werden. Der Rekonfigurationsaufwand wird dabei in die Disziplinen Mechanik, Elektrik und Software unterteilt. Ist ein Modul ungeeignet, so besteht das Ziel stets in dem Entfernen des Moduls und dem Hinzufügen eines neuen Moduls, wodurch sich Aufwände in allen der drei Disziplinen einstellen. Im Kontext der Wiederverwendung wird eine konstruktive Anpassung von Modulen nicht berücksichtigt. Mechanische- und elektrische Eigenschaften des Moduls bleiben damit unberührt und es findet einzig eine Anpassung auf der Softwareebene statt.

Bei dem Hinzufügen und Entfernen von Modulen bezieht sich der Rekonfigurationsaufwand auf das Modul selbst. Wird z. B. ein Roboter ausgetauscht, so sind Aufwände zum Entfernen und Hinzufügen bzgl. Mechanik und Elektrik notwendig. Ebenso wird zumeist beim Austausch eine vollständige neue Programmierung und softwareseitige Einbindung des Roboters gefordert. Hingegen wird bei der Anpassung von Modulen stets im Detail untersucht, welche Attribute sich ändern und angepasst werden müssen. Ändern sich z. B. die Fügepositionen oder das Drehmoment, so ist es ausreichend die bestehende Software von Roboter und Schrauber auf die neuen Attribute anzupassen.

Für die Bewertung des Aufwands ist eine qualitative Bewertung durch Domain Experten mit Hilfe einer Intervallskala notwendig. Ziel ist es, eine Gewichtung der einzelnen Rekonfigurationsaufwände relativ zum Gesamtaufwand zu erhalten. Der Gesamtaufwand stellt sich jeweils durch Austausch eines jeden Moduls dar. Um diese Gewichtung vorzunehmen, wird ein Paarvergleich mit einer Intervallskala von eins bis neun bzw. deren reziproken Werten



analog des Analytischen-Hierarchie-Prozesses (AHP) nach (Saaty 1987) vorgeschlagen. Diese feingliedrige Intervallskala ermöglicht es zum einen auch bei mehreren Modulen eine detaillierte Differenzierung der Aufwände vorzunehmen und zum anderen die Aufwände jeweils relativ zueinander zu bewerten. Der Rekonfigurationsaufwand für die Anpassung der Software des Moduls stellt sich abhängig des anzupassenden Attributes heraus.

**Analyse der Eintrittswahrscheinlichkeit**

Zur Analyse der Ausprägung der Attribute in zukünftigen Szenarien sind Schätzungen von Domain Experten erforderlich, da die Entwicklung neuer Fahrzeuge sowie die Optimierung der Prozesse der Automobilendmontage eher mit einem evolutionären Prozess zu vergleichen sind (siehe Kapitel 3.5.2). Die quantitative Bewertung ausgehend bestehender Daten und Informationen ist somit nicht zielführend. Allgemein können sich Szenarien hinsichtlich produkt-, prozess und strukturbezogener Attribute ändern. Die Analyse produkt- und prozessbezogener Attribute erfordert Experten aus der Entwicklung neuer Fahrzeuge. Strukturbezogene Attribute hingegen adressieren Experten aus der Produktion bzw. Prozessplanung. Bei den Ausprägungen ist zudem zu differenzieren, mit welcher Eintrittswahrscheinlichkeit ein Attribut sich außerhalb oder innerhalb des Fähigkeitskorridors verändert (siehe Abbildung 31). Attribute deren Ausprägung sich in zukünftigen Szenarien außerhalb des Fähigkeitskorridors befinden, fordern das Module hinzugefügt bzw. entfernt werden. Ausprägungen innerhalb des Fähigkeitskorridors fordern hingegen lediglich eine Anpassung der Software.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit zukünftiger Szenarien lässt sich aufgrund des langen Planungszeitraums häufig nur schwer bestimmen. Daher sollen die Schätzungen der Eintrittswahrscheinlichkeit mit Hilfe einer Punkteskala und Wahrscheinlichkeitsbereichen erfolgen. In der Tabelle 6 sind so exemplarisch zehn Bereiche aufgeführt, nach denen die prozentuale Eintrittswahrscheinlichkeit eingeordnet werden kann. Zusätzlich besteht die Möglichkeit den Eintritt eines Szenarios mit Hilfe einer null vollständig auszuschließen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit soll anschließend über eine Punkteskala von null bis zehn ausgegeben werden. Die Verteilung der Punkte ist so ausgelegt, dass eine Worst-Case-Betrachtung der Eintrittswahrscheinlichkeit erfolgt. Jedoch kann über mehrere Anwendungen als auch abhängig des Informationsstands der Domain Experten eine Anpassung der Einstufungsskala getroffen werden.

*Tabelle 6: Exemplarische Einstufung der Eintrittswahrscheinlichkeit nach Bereichen*

|                                  |   |       |        |        |        |        |        |        |        |        |         |
|----------------------------------|---|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Eintrittswahrscheinlichkeit in % | 0 | >0-10 | >10-20 | >20-30 | >30-40 | >40-50 | >50-60 | >60-70 | >70-80 | >80-90 | >90-100 |
| Punkte                           | 0 | 1     | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10      |

Das Risiko der Rekonfiguration kann folgend zusammen aus dem gewichteten Rekonfigurationsaufwand und der Eintrittswahrscheinlichkeit ermittelt werden. Für das Risiko der Rekonfiguration hinsichtlich dem Hinzufügen und Entfernen von einzelnen Modulen ( $R_{H/E}$ ) ist nach (3) die Summe der sich auf das Modul beziehenden Eintrittswahrscheinlichkeiten ( $S_{H/E}$ ) mit der Summe der gewichteten Rekonfigurationsaufwänden für Mechanik ( $F_M$ ), Elektrik ( $F_E$ ) und Software ( $F_S$ ) zu multiplizieren. Abhängig des neuen Szenarios kann es so z. B. vorkommen, dass sich mehrere Attribute verändern und ein Modul beeinflussen. Somit sind sowohl einzelne als auch kummulierte Wahrscheinlichkeiten zu berücksichtigen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit der Rekonfiguration ( $S_{H/E}$ ) eines einzelnen Moduls kann dabei jedoch höchstens den Wert zehn annehmen. Das Risiko der Rekonfiguration ausgehend der Anpassung eines Moduls ( $R_A$ ) ergibt sich nach (4) aus der Eintrittswahrscheinlichkeit zur Anpassung ( $S_A$ ) und dem gewichteten Rekonfigurationsaufwand der Anpassung der Software ( $F_S$ ). Zur Ermittlung des Gesamtrisikos sind die Summen der unabhängig voneinander betrachteten Risiken der einzelnen Module zusammenzufassen (5). Das resultierende Risiko bezieht sich relativ auf das maximal mögliche Risiko, welches maximal den Wert zehn annehmen kann.

$$R_{H/E} = \sum S_{H/E} \cdot \sum (F_M + F_E + F_S) \quad ; \text{ mit } S_{H/E} = 0 \text{ bis } 10 \quad (3)$$

$$R_A = \sum S_A \cdot \sum F_S \quad (4)$$

$$R_G = \sum R_{H/E} + \sum R_A \quad (5)$$

Das beschriebene Vorgehen zur Ermittlung des Risikos der Rekonfiguration von Modulen in der Automobilendmontage ist noch einmal in der Abbildung 32 zusammengefasst dargestellt. Das Vorgehen stellt allgemein eine Bottom-up-Strategie dar (siehe Kapitel 3.6) und kann so für kleinere als auch größere Ebenen von Modulen verwendet werden.

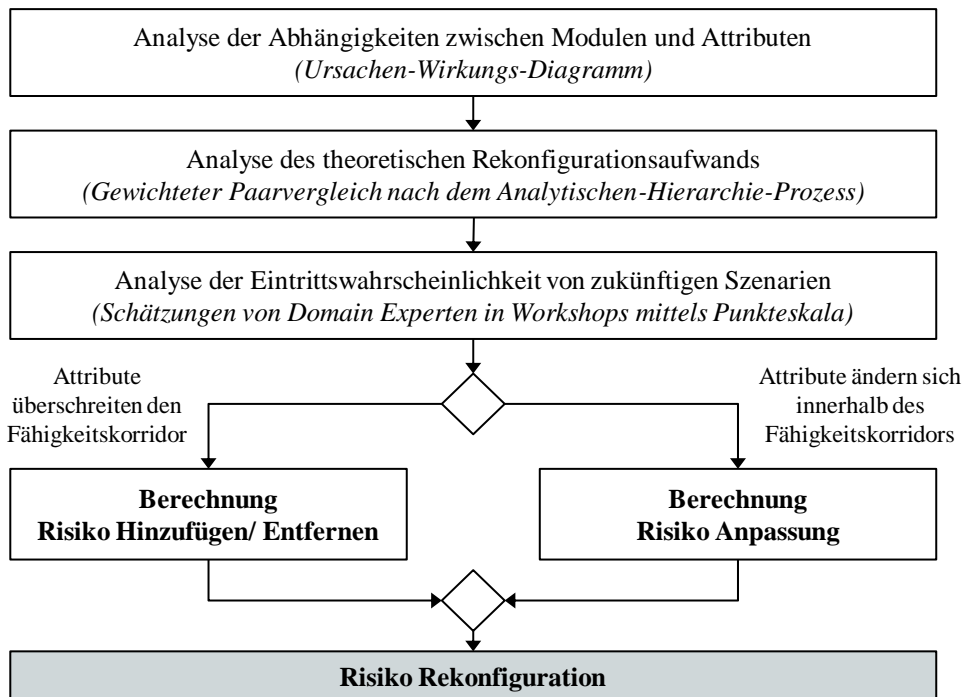


Abbildung 32: Bottom-up-Strategie zur Ermittlung des Risikos der Rekonfiguration

Zu erwähnen ist, dass das Vorgehen keine erneute Konfiguration des Moduls für die neuen Anforderungen beinhaltet, wie es z. B. in (Weißgraber, Heieck und Ackermann 2021) der Fall ist. Somit wird auch nicht berücksichtigt, ob durch neue Module ggf. weitere von der Rekonfiguration vorher nicht berücksichtigte Module ebenfalls auszutauschen sind. Ausgehend der unsicheren Aussage der Eintrittswahrscheinlichkeit sowie der fehlenden detaillierten Ausprägung der Attribute in den zukünftigen Szenarien wird in dieser Arbeit von einer derartigen Konfiguration abgesehen. Kosten für neue Module können somit in der Analyse der Wiederverwendbarkeit ebenfalls nicht berücksichtigt werden.

### 7.3 Mensch-Maschine Faktor von Modulen

Nach Kapitel 7.1.2 ist mit Hilfe eines multikriteriellen Faktors, in dieser Arbeit Mensch-Maschine Faktor genannt, das Modul nach den Anforderungen: Datenqualität und Wissen, Bedienbarkeit und Ergonomie, Wartbarkeit sowie Anlagen- und Prozessüberwachung zu bewerten. Die Datenqualität kann weiter abhängig der wiederverwendbaren Artefakte (siehe (Biffl, Lüder und Gerhard 2017)) in verschiedene Gruppen unterteilt werden. Im Detail ist die Datenqualität von CAD-Daten, Dokumentationen und Software bzw. Programmen zu bewerten. Da i. d. R. ein jedes Modul in der Automobilendmontage vor seiner Nutzung erprobt wird, sind ebenfalls vorhandene Informationen und das vorhandene Wissen aus Tests und Betrieb zu berücksichtigen. Insgesamt ergeben sich aus der Phase des Engineerings damit fünf einzelne Anforderungen und aus der Phase der Nutzung/ Wartung drei Anforderungen, aus denen zusammen der Mensch-Maschine Faktor zu bilden ist (siehe Anhang 2, Tabelle 12). Zur Analyse des Mensch-Maschine Faktors ist zunächst eine Gewichtung der ein-

zelen Anforderungen und anschließend eine Bewertung dieser erforderlich. Für die Gewichtung ist der AHP (siehe (Saaty 1987)) verwendet worden. In einem Workshop ist mit Domain Experten aus der Phase des Engineerings sowie der Nutzung und Wartung eine Gewichtung vorgenommen worden. Hierbei hat sich gezeigt, dass im Engineering den CAD-Daten sowie den Informationen und dem Wissen eine höhere Wichtigkeit zugeordnet wird als Dokumentationen und Programmen. Die Anforderungen der Nutzung/ Wartung sind hingegen alle als gleichwertig bewertet worden. Da es sich bei der Gewichtung trotz des AHP weiterhin um eine zum Teil subjektive Darstellung der Domain Experten des Workshops handelt, werden mit zunehmender Betrachtung verschiedener Anwendungsfälle und der Anwendung der Methode erneute bzw. zusätzliche Gewichtungen empfohlen.

Die Bewertung der einzelnen Anforderungen ist qualitativ durchzuführen. Um hierbei die Gewichtung der Anforderungen einfließen lassen zu können ist es erforderlich, die Anforderungen mit Hilfe einer Punkteskala zu bewerten. In dem Anhang 2, der Tabelle 13 und Tabelle 14 sind daher zusammen mit Domain Experten Ordinalskalen zur Einstufung der einzelnen Anforderungen definiert worden. Bei der Definition der Einstufungen ist in der ersten Anwendung die Ebene einer Montageeinheit und Montagestation (siehe Kapitel 2.2) betrachtet. Für kleinere Ebenen des Moduls sind ggf. veränderte Einstufungen zu verwenden.

Eine Einstufung der Anforderungen auf einer Skala von null bis fünf hat sich hierbei als ausreichend feingliedrig erwiesen. Der Mensch-Maschine Faktor kann so im Best-Case fünf Punkte betragen. Im Worst-Case hingegen null Punkte. Die Datenqualität von CAD-Daten besitzt idealerweise fünf Punkte, in dem z. B. kinematisierte, intelligente CAD-Daten vorliegen. Mit Hilfe dieser Daten lassen sich direkt Simulationen durchführen oder Verhalten und Funktionsweisen des Moduls analysieren. Im zweit besten Fall liegen die vollständigen intelligenten CAD-Daten vor. Nicht intelligenten Daten, welche ausschließlich Oberflächen des Moduls illustrieren und nicht bearbeitet werden können, werden einem geringeren Stellenwert zugeordnet. Sollten keine CAD-Daten vorhanden sein, wird die Datenqualität mit null Punkten bewertet. Bei den Informationen und dem Wissen aus Tests und Betrieb wird zwischen Tests der Komponenten, Tests des Gesamtsystems und dem Betrieb des Gesamtsystems unterschieden. Auch hier handelt es sich um erste Einstufungen, welche mit fortlaufenden Anwendungen zu evaluieren sind.

Die Bedienbarkeit/ Ergonomie sowie die Wartbarkeit werden ebenfalls über eine allgemeine Ordinalskala eingestuft. Hintergrund ist, dass die Anforderungen zum Teil von mehreren Faktoren abhängen. Die Wartbarkeit ist z. B. abhängig von der Zugänglichkeit zu dem jeweiligen Modul, Austauschbarkeit des Moduls oder auch vom Aufwand zur Referenzierung des Moduls. Bei der Anforderung der Anlagenzustands- und Prozessüberwachung findet idealerweise ein Condition Monitoring statt, bei dem alle Zustände des Moduls und des Prozesses erfasst und ausgewertet werden. Die Mindestanforderung an Anlagen in der Automo-

bilendmontage ist, dass eine Anlagenzustandsüberwachung stattfindet. Häufig sind bei Prozessen, so auch bei Schraubprozessen der Kategorie A und B, ebenfalls die Drehmomente bzw. Drehwinkel der montierten Schrauben zu erfassen (siehe Kapitel 2.3.2).

### 7.4 Kosten-Nutzen-Verhältnis

Zur Bewertung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses innerhalb der fähigkeitsbasierten Planung soll folgend zunächst erläutert werden, welche Kostenursachen im Lebenszyklus auftreten können. Außerdem werden anschließend, wie in Kapitel 5.3 beschrieben, Stellhebel zur Kosteneinsparung dargestellt. Wie im Gesamtkonzept (siehe Kapitel 6.1) vorgestellt, soll die Optimierung der Anlagenkonzepte auf Basis des Kosten-Nutzen-Verhältnisses durchgeführt werden. Hierfür werden abschließend die Einflussfaktoren auf das Kosten-Nutzen-Verhältnis für diese Arbeit dargestellt.

#### Relevante Kostenursachen Automobilendmontage

Zur Identifikation der Lebenszykluskosten von Anlagenkonzepten sind in Anlehnung an die (VDI 2884) sowie des Anlagenentwurfsprozesses aus Kapitel 4.1 nach der (VDI/ VDE 3695) die einzelnen relevanten Kosten abhängig der Lebenszyklusphase in Abbildung 33 dargestellt. Die letzte Phase der Entsorgung bzw. des Rückbaus wird innerhalb dieser Arbeit nicht mitberücksichtigt. Grund ist, dass zumeist nicht eindeutig bestimmt werden kann, ob die Anlagen zum Ende des Projektes entsorgt oder für neue Projekte rekonfiguriert und wiederverwendet werden. Neben den Entsorgungskosten werden sonstige Kosten ausgehend von Zinsen, Steuern oder auch Versicherungen ebenfalls nicht berücksichtigt. Für eine ganzheitliche Ermittlung der Lebenszykluskosten sind diese notwendig (Ehrlenspiel et al. 2007). Ziel der Methode besteht einzig in einer Vergleichbarkeit der Kosten-Nutzen-Verhältnisse der Anlagen, womit die Berücksichtigung der sonstigen Kosten außen vorgelassen wird. Damit ergeben sich im Wesentlichen Beschaffungs-, Logistik- und Installationskosten sowie Kosten für die Planung, Erprobung und den Betrieb.

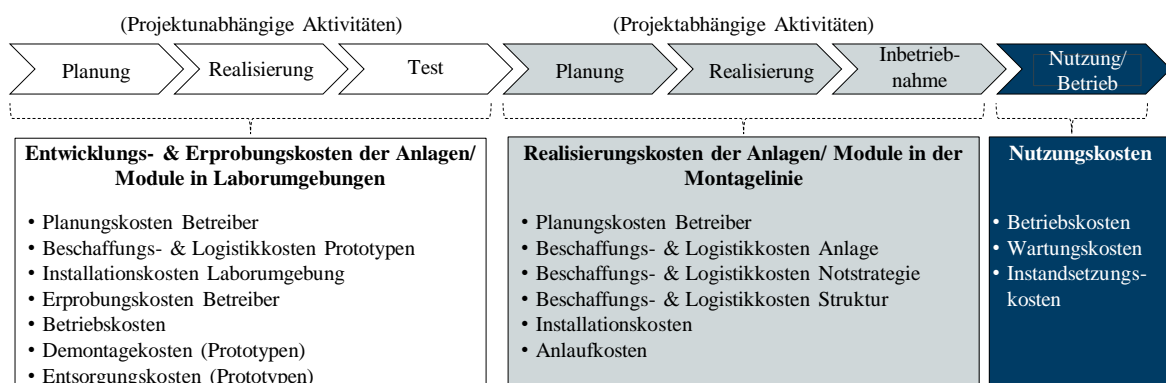


Abbildung 33: Relevante Kostenursachen zur Bewertung und Auswahl von Modulen (in Anlehnung an Herrmann 2010, VDI 2884)

### **Kosteneffekte aus der Wiederverwendung**

Bei der Wiederverwendung von Anlagen können Skalen- und Lernkurveneffekte erzielt werden (Schuh 2012). Durch Skaleneffekte können folgend vor allem die Investitionskosten reduziert werden. Kosteneffekte aus Lernkurveneffekten zeigen sich hingegen vor allem in geringeren Realisierungskosten aufgrund kürzerer Inbetriebnahmen. Neben Skalen- und Lernkurveneffekten generieren sich bei der Wiederverwendung von Anlagen Kosteneffekte aus der Übernahme von Artefakten bzw. Anteilen von Artefakten. Prinzipiell kann bei der Wiederverwendung von gesamten Anlagen davon ausgegangen werden, dass weitaus mehr Informationen wiederverwendet werden können als bei der Wiederverwendung einzelner Anlagenkomponenten (Klein 2014). Daher sind die Artefakte abhängig der Ebene der Ressource zu identifizieren und einzuteilen. In (Biffel, Lüder und Gerhard 2017) und (Hell 2018) sind bereits abhängig der Ressourcenebenen wiederverwendbare Artefakte analysiert. Eine reine Identifikation der wiederverwendbaren Artefakte reicht für eine detaillierte Bewertung der Kosteneffekte jedoch nicht aus. In der Praxis unterscheiden sich Projekte zueinander, wodurch Artefakte nur zum Teil in folgenden Projekten übernommen werden können und angepasst werden müssen. Aus diesem Grund ist für eine detaillierte Aufschlüsselung der Kosteneinsparungen der Wiederverwendungsanteil eines jeden Artefakts im Detail zu analysieren. Da es sich innerhalb der Arbeit um eine Grobplanung der Wiederverwendungen handelt, wird an dieser Stelle eine Abschätzung der eingesparten Stunden durch Domain Experten als hinreichend genau angesehen.

### **Kosteneffekte aus der Bündelung**

Nach Kapitel 5.1 ist eine Anforderung an die Methode die örtliche Bündelung von Anlagen in der Montagelinie, um so ggf. Module mehrfach verwenden bzw. einsparen zu können. Hierdurch lassen sich vor allem Investitionskosten einsparen. Potentielle Komponenten, die durch Bündelung mehrfachverwendet werden können, sind innerhalb der fähigkeitsbasierten Planung der Wiederverwendung herauszustellen.

Neben der Einsparung von Anlagenkomponenten eröffnen sich durch die Bündelung von Anlagen weitere Potentiale. Eine gebündelte Ausschreibung und Beschaffung der örtlich gebündelten Anlagen kann z. B. zu Einsparungen in den Investitionskosten der Anlage führen (Spang 2016). So können durch Vergabe mehrerer Projekte an einen Lieferanten die Kosten für Dokumentationen, Projektdurchführung, Aufbau oder auch der Inbetriebnahme gesenkt werden. Die gebündelte Ausschreibung und Beschaffung von gleichen Anlagen vereinfacht zudem die Realisierung von Skaleneffekten seitens der Investitionskosten der Anlagen. Die Planungsmethode dieser Arbeit stellt somit auch ein effizientes Vorgehen zur Identifikation von Anlagen für die gebündelte Beschaffung dar.

### **Kosten-Nutzen-Verhältnis im Kontext der Methode**

Der Nutzen von Anlagen in der Automobilendmontage kann über verschiedene Ansätze ermittelt werden. Ein Ansatz ist es, den Nutzen über die eingesparte Fertigungszeit zu ermitteln. Die Fertigungszeit stellt in der Automobilendmontage die Arbeitszeit für einzelne Arbeitsschritte dar und setzt sich aus der konstruktiv bedingten EHPV (Engineered Hours Per Vehicle) sowie der durch das Produktionssystem bedingten Zeit ausgehend von Wegen, Wartung, etc. zusammen. Vorteil der Fertigungszeit ist es, dass diese eindeutig einer Anlage zugeordnet werden kann und den Nutzen unabhängig der Montagelinie darstellt. Ein anderer Ansatz ist es, den Nutzen über die in der Montagelinie eingesparten Mitarbeiter auszugeben. Hierbei kann es jedoch zwischen den einzelnen Montagelinien zu Unterschieden kommen. Die Anzahl an eingesparten Mitarbeitern ist nicht nur von der automatisierten Fertigungszeit, sondern auch von der vorherigen Auslastung des Mitarbeiters, der Taktzeit der Montagelinie und auch den Einflüssen anderer Anlagen abhängig. Ebenso können nur vollständig eingesparte Mitarbeiter berücksichtigt werden. Der Nutzen lässt sich folgend nur schwer eindeutig einer Anlage zuordnen. Gegenüber der Fertigungszeit stellen die eingesparten Mitarbeiter jedoch den tatsächlichen Nutzen bezogen auf die Montagelinie dar. Im Kontext der Planungsmethode ist so der Ansatz der Fertigungszeit insbesondere innerhalb der Konfiguration von Anlagenkonzepten in Kapitel 8 und der Analyse der Wiederverwendbarkeit von Modulen zu verwenden, bei denen jeweils singular eine Anlage bzw. ein Modul betrachtet wird. Der Ansatz der eingesparten Mitarbeiter ist hingegen für die Entwicklung des Integrationskonzepts in Kapitel 8.3 zu bevorzugen, um den tatsächlichen Nutzen von Anlagen auf die jeweilige Montagelinie zu identifizieren.

In der Tabelle 7 sind die Kostenursachen, Kosteneffekte und der Nutzen der einzelnen Schritte der Planungsmethode zugeordnet. Innerhalb der Konfiguration von Anlagenkonzepten sind so die Investitionskosten wie z. B. Beschaffungs-, Logistik-, Installations- und Anlaufkosten sowie die Betriebskosten ins Verhältnis zu der Fertigungszeit zu setzen. Die Einbeziehung der Entwicklungs- und Erprobungskosten sowie der Kosteneffekte ausgehend der Wiederverwendung erfordern, dass die Wiederverwendungshäufigkeit einer Anlage bekannt ist. Die Entwicklungs- und Erprobungskosten sind so z. B. anteilmäßig auf die einzelnen Anlagen aufzuteilen. Konzept und Investitionen für die Notstrategie sowie Investitionen und Anpassungen an der Struktur der Montagelinie können erst durch Entwicklung des Integrationskonzepts bestimmt werden. Kosteneffekte ausgehend der örtlichen Bündelung und Mehrfachverwendung von Modulen können ebenfalls erst mit Hilfe des Integrationskonzepts herausgestellt werden.

Tabelle 7: Kosten und Nutzen im Kontext der Methode

| Kategorie                        | Kosten, Effekte & Nutzen                       | Keine Berücksichtigung | Konfiguration Anlagenkonzepte | Entwicklung Integrationskonzepte | Analyse Wiederverwendbarkeit |
|----------------------------------|--|------------------------|-------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| Entwicklungs- & Erprobungskosten | Planungskosten Betreiber                       |                        |                               |                                  | X                            |
|                                  | Beschaffungs- und Logistikkosten Prototypen    |                        |                               |                                  | X                            |
|                                  | Installationskosten Laborumgebung              |                        |                               |                                  | X                            |
|                                  | Erprobungskosten Betreiber                     |                        |                               |                                  | X                            |
|                                  | Betriebskosten                                 |                        |                               |                                  | X                            |
|                                  | Demontagekosten (Prototypen)                   |                        |                               |                                  | X                            |
|                                  | Entsorgungskosten (Prototypen)                 |                        |                               |                                  | X                            |
| Realisierungskosten              | Planungskosten Betreiber                       |                        |                               | X                                | X                            |
|                                  | Beschaffungs- & Logistikkosten Anlage          |                        | X                             | X                                | X                            |
|                                  | Beschaffungs- & Logistikkosten Notstrategie    |                        |                               | X                                | X                            |
|                                  | Beschaffungs- & Logistikkosten Struktur        |                        |                               | X                                | X                            |
|                                  | Installationskosten                            |                        | X                             | X                                | X                            |
|                                  | Anlaufkosten                                   |                        | X                             | X                                | X                            |
| Nutzungskosten                   | Betriebs-, Wartungs- und Instandsetzungskosten |                        | X                             | X                                | X                            |
| Kosteneffekte Bündelung          | Mehrfachverwendung Module                      |                        |                               | X                                | X                            |
|                                  | Gebündelte Vergabe von Anlagen                 |                        |                               | X                                | X                            |
| Kosteneffekte Wiederverwendung   | Skaleneffekte ausgehend der Wiederverwendung   |                        |                               |                                  | X                            |
|                                  | Einsparungen von Entwicklungen & Erprobungen   |                        |                               |                                  | X                            |
|                                  | Wiederverwendung von Engineering-Artefakten    |                        |                               |                                  | X                            |
| Nutzen                           | Fertigungszeit                                 |                        | X                             |                                  | X                            |
|                                  | Eingesparte Mitarbeiter                        |                        |                               | X                                |                              |

### 7.5 Analyse des Wiederverwendungsgrades einzelner Module

Entsprechend der Forschungsfrage drei ist zu klären, wie der Wiederverwendungsgrad einzelner bestehender oder neuer Module wie z. B. eines neuen Roboters oder Schraubers, ausgehend einer bestehenden Referenzmenge an Anlagenkonzepten analysiert und bewertet werden kann. Die Betrachtung liegt hierbei auf kleineren Modulen, welche in Anlagenkonzepten mit einem Bezug zu bestimmten Produkten und Prozessen implementiert werden können. Allgemein gilt es, das Modul hinsichtlich der in Kapitel 7.1.2 hergeleiteten Kriterien zu bewerten. Im Detail sind hierfür jedoch zunächst die Wiederverwendungen bzw. der Wiederverwendungsgrad herauszustellen.

Voraussetzung für die singuläre Analyse einzelner Module ist, dass bereits eine Referenzmenge an geplanten Anlagenkonzepten mit einem Bezug zu Produkten, Prozessen und der Struktur der Montagelinie vorliegt. Erst hierdurch können ganzheitlich die Anforderungen an das neue Modul bestimmt werden. Um dabei zu bewerten, ob das jeweilige Modul geeignet ist oder nicht, sind die Fähigkeiten mit den spezifischen Anforderungen des Anlagen-



konzepts abzugleichen. Hierbei müssen die Fähigkeiten des Moduls sowohl mit den Anforderungen des Produkts und Prozesses sowie der Struktur kompatibel sein. Ebenso ist zu prüfen, ob das Modul mit den anderen Modulen kompatibel ist. Soll z. B. ein neuer Roboter hinsichtlich seiner Eignung überprüft werden, so ist die Traglast des Roboters mit dem Gewicht des Endeffektors sowie den Prozesskräften zu vergleichen. Nur wenn die maximale Traglast nicht überschritten wird, kommt der neue Roboter für das Anlagenkonzept in Frage.

Das Vorgehen zur Analyse des Wiederverwendungsgrades des Moduls ist in der Abbildung 34 dargestellt. Jedes Anlagenkonzept ist hierbei im Einzelnen hinsichtlich seiner Anforderungen an das betrachtete Modul zu untersuchen. Die Abhängigkeiten zwischen den Fähigkeiten und Anforderungen werden innerhalb des Kapitels 8 im Detail untersucht. Für die Überprüfung der Anforderungen und Fähigkeiten der verschiedenen Anlagenkonzepte kann zudem, ähnlich wie in (Smale und Ratchev 2009), eine Matrix zur Hilfe genommen werden. Ausgehend der geeigneten Anlagenkonzepte kann folgend der Wiederverwendungsgrad bestimmt und die Wiederverwendbarkeit bewertet werden. Zusammengefasst adressiert das Vorgehen die Beantwortung der Forschungsfrage drei und ermöglicht eine Analyse der Wiederverwendbarkeit neuer Module, ohne eine erneute Wiederholung der fähigkeitsbasierten Planung und Entwicklung von Integrationskonzepten.

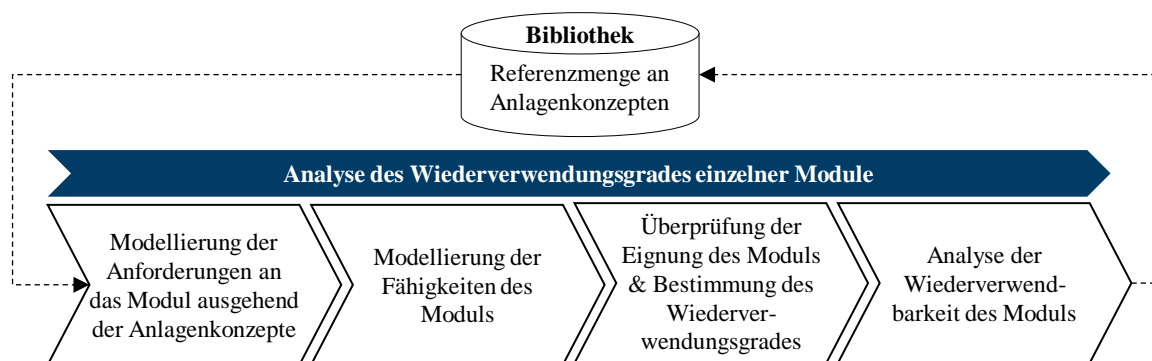


Abbildung 34: Analyse der Wiederverwendbarkeit eines einzelnen Moduls

## 8 Fähigkeitsbasierte Planung der Wiederverwendung

Entsprechend des in Kapitel 5.4 hergeleiteten Schalenmodells soll folgend die fähigkeitsbasierte Planung der Wiederverwendungen im Detail erläutert werden. Fokus liegt hierbei auf den Forschungsfragen der drei inneren Ebenen des Schalenmodells (siehe Kapitel 5.4). Nach dem Konzept aus Kapitel 6.1 ist zunächst eine Modellierung von PPRS, anschließend eine Konfiguration von Anlagenkonzepten und zuletzt eine Entwicklung des Integrationskonzepts zur finalen Auswahl von Anlagenkonzepten vorzunehmen.

### 8.1 Modellierung von PPRS

Dieses Kapitel richtet sich an die zweite Ebene des Schalenmodells (siehe Abbildung 35), der Modellierung der Anforderungen und Fähigkeiten von PPRS. Dabei sind die Forschungsfragen vier bis sechs zu beantworten. Zunächst soll hierzu ein Informationsmodell für die Modellierung der Anforderungen von Produkt und Prozess sowie der Fähigkeiten von Ressourcen und der strukturellen Eigenschaften der Automobilendmontage erarbeitet werden.

Aufbauend auf dem Informationsmodell sind anschließend jeweils Attribute abzuleiten, mit denen eine detaillierte Beschreibung der Eigenschaften und Informationen der Produkte, Prozesse, Ressourcen und auch Struktur möglich ist. Speziell für die Modellierung der Anforderungen ist außerdem, gemäß der Forschungsfrage fünf, eine Lösung zur Berücksichtigung der Varianz ausgehend der verschiedenen Produkte und Prozesse einer Montagelinie zu entwickeln.

Zusammengefasst adressiert dieses Kapitel somit die Beantwortung der folgenden Forschungsfragen:

4. *„Wie können die Anforderungen ausgehend von Produkten und Prozessen aus der Automobilendmontage in einem Modell dargestellt werden?“*
5. *„Wie kann die Varianz der Anforderungen, ausgehend der Bandbreite an Produkten und Prozessen in der Automobilendmontage, für eine optimale Auswahl einer Ressource dargestellt werden?“*
6. *„Wie können strukturelle Eigenschaften und Rahmenbedingungen der Automobilendmontage sowie die Fähigkeiten von Ressourcen in einem Modell dargestellt werden?“*

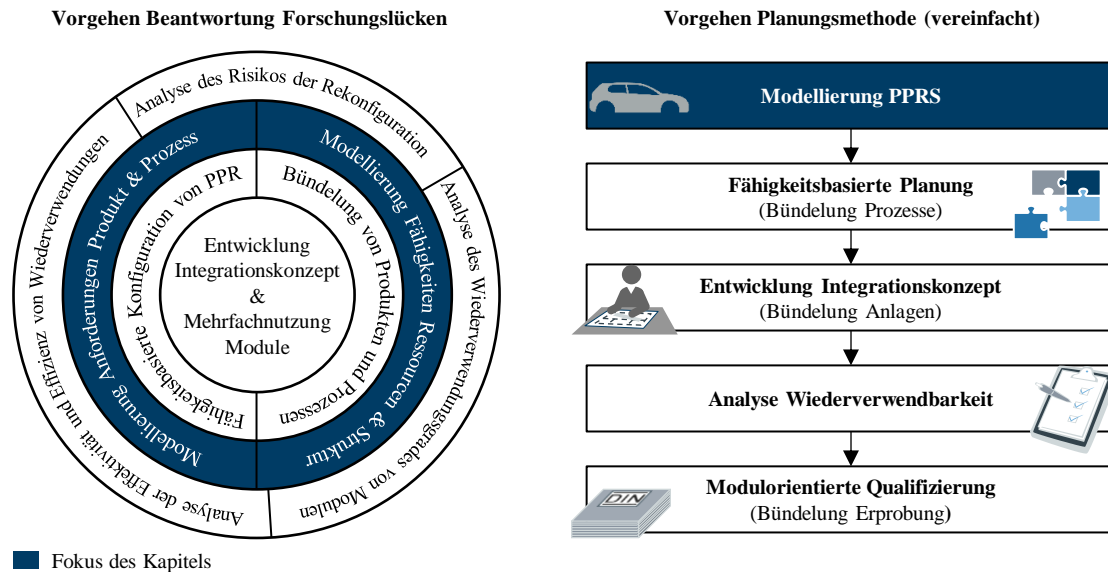


Abbildung 35: Einordnung des Kapitels 8.1 in den Forschungskontext und das Gesamtkonzept

### 8.1.1 Informationsmodell PPRS - Automobilendmontage

Wie in Kapitel 4.5 dargestellt, existieren für die Modellierung von PPRS bereits eine Reihe von Arbeiten. Diese sind derzeit jedoch noch nicht hinsichtlich ihrer Eignung für die Automobilendmontage überprüft worden. Das Ziel besteht daher in der Verwendung der „Best Practice“ Ansätze für ein Modell, angepasst für die Automobilendmontage. Im Folgenden werden so zunächst die identifizierten „Best Practice“ Ansätze vorgestellt.

#### Ansatz 1: Unterteilung des Modells in ein Anforderungs- und ein Umweltmodell

(Backhaus 2016) und (Michniewicz 2019) unterteilen das PPRS Modell weiter in ein Aufgaben- und Umweltmodell. Innerhalb des Aufgabenmodells werden speziell für die aufgabenorientierte Programmierung von Robotern Zielzustände und Aktionsfolgen beschrieben. Im Umweltmodell sind hingegen alle Informationen von Betriebsmitteln, Robotern, Werkzeugen oder auch der Umgebung der Produktion hinterlegt (Humburger 1998, Weber 2009). Nach (Backhaus 2016) stellt das Aufgabenmodell so eine „Nutzer definierte Abbildung der Aufgabe, repräsentiert durch einzelne Produkte, Prozesse oder Skills“ dar. Das Umweltmodell wird von (Backhaus 2016) als „definierte Abbildung des gesamten Montagesystems“ bezeichnet, in dem einzelne Ressourcen mit ihren Skills, Beziehungen und Bedingungen beschrieben werden (Backhaus 2016).

Eine ähnliche Einteilung soll für das Informationsmodell dieser Arbeit verwendet werden. Da das Ziel jedoch nicht in einer aufgabenorientierten Programmierung sondern in der Konzeption von Anlagen liegt, sollen entsprechend der Vorgehensweisen zum Engineering von Anlagen aus Kapitel 4.1.2 die Anforderungen an Anlagen beschrieben werden. Das PPRS Modell dieser Arbeit soll damit in ein Anforderungs- und Umweltmodell unterteilt werden.

### **Ansatz 2: Eindeutige Beschreibung von Anforderungen und Fähigkeiten**

Wie in Kapitel 4.3 beschrieben, erfolgt in ER-Modellen eine Zuordnung von Objekten über eine eindeutige Beschreibung von Merkmalen bzw. Schlüsselattributen (siehe Kapitel 4.3.1). In den Arbeiten von (Smale und Ratchev 2009) und (Hammerstingl und Reinhart 2017) wird ebenfalls eine eindeutige Beschreibung mit Hilfe von Skills bzw. Fähigkeiten realisiert. Dabei werden Anforderungen aus Produkten und Prozessen mit Hilfe erforderlicher Fähigkeiten und die Fähigkeiten von Ressourcen als bestehende bzw. verfügbare Fähigkeiten beschrieben. Eine eindeutige Beschreibung dieser beiden Fähigkeitsarten ermöglicht so eine einfache Zuordnung der Produkte, Prozesse und Ressourcen. Innerhalb dieser Arbeit soll ebenfalls eine eindeutige Beschreibung von Anforderungen und Fähigkeiten erfolgen. Dazu wird auf Basis dieses Ansatzes ebenfalls eine Einteilung in erforderliche und verfügbare Fähigkeiten vorgenommen.

### **Ansatz 3: Unterteilung in elementare und zusammengesetzte Fähigkeiten**

Nach (Järvenpää 2012) und (Hammerstingl und Reinhart 2017) können Fähigkeiten weiter in elementare und zusammengesetzte Fähigkeiten unterteilt werden (siehe Kapitel 4.5). Elementare Fähigkeiten sind einer einzelnen Komponente zuzuordnen. Zusammengesetzte Fähigkeiten beinhalten mehrere elementare Fähigkeiten und sind einem Zusammenschluss von Komponenten bzw. einer Anlage zuzuordnen (Hammerstingl und Reinhart 2017). Für die Wiederverwendung von Ressourcen verschiedener Hierarchieebenen (siehe Kapitel 2.2) sind auch deren unterschiedlichen Funktionalitäten zu berücksichtigen. Dies soll innerhalb dieser Arbeit durch Beschreibung der Funktionalitäten mit Hilfe elementarer und zusammengesetzter Fähigkeiten erfolgen. Mit Hilfe elementarer Fähigkeiten können z. B. kleinere wiederverwendbare Module ausgewählt werden, wobei durch zusammengesetzte Fähigkeiten das Zusammenspiel mehrerer dieser Module beschrieben bzw. überprüft werden kann.

### **Ansatz 4: Strukturierung des Produktionssystems**

Für eine detaillierte Beschreibung des Produktionssystems mit seinen Eigenschaften und Bedingungen ist eine Strukturierung notwendig. Es existieren eine Reihe von Arbeiten, die ein Referenzhierarchisierungsmodell für die Strukturierung von Ressourcen vorstellen, z. B. (VDI/ VDE 2015), (Kiefer 2007) oder (Walzl und Wildemann 2014). In dieser Arbeit wurde in Kapitel 2.2 Bezug auf die Strukturierung der Produktionssystemstruktur nach (Biffli, Lüder und Gerhard 2017) genommen, welche speziell für eine Modellierung der Struktur der Automobilindustrie ausgelegt ist. Das Referenzmodell wurde zudem bereits in mehreren Arbeiten für die Automobilindustrie geprüft und angewendet. Einen Abgleich der verschiedenen Referenzmodelle zeigt (Hell 2018), in der speziell für die Wiederverwendung im Karosseriebau das Referenzmodell nach (Biffli, Lüder und Gerhard 2017) gewählt wurde. Dieses ist ebenso in der Arbeit von (Roepke et al. 2016) für die Automobilendmontage verwendet

worden. Zur Erfüllung der Forschungsfrage sechs, welche eine Beschreibung der strukturellen Eigenschaften und Bedingungen der Automobilendmontage beinhaltet, soll in dieser Arbeit ebenfalls das Referenzmodell aus Kapitel 2.2 verwendet werden.

### PPRS Modell für die Automobilendmontage

Unter der Berücksichtigung der vier Ansätze wurde das in Abbildung 36 dargestellte PPRS Modell erarbeitet. Angelehnt an (Backhaus 2016) unterteilt sich dieses in ein Anforderungs- und Umweltmodell. Innerhalb des Anforderungsmodells erfolgt die Beschreibung von Produkt und Prozess einschließlich der Anforderungen als geforderte Fähigkeiten. Das Umweltmodell besitzt hingegen die Informationen und Daten der Ressource, der Struktur sowie der verfügbaren Fähigkeiten der Ressource. Sowohl zwischen Produkt und Prozess als auch zwischen der Ressource und der Struktur besteht eine direkte Verbindung. Fähigkeiten stellen eine direkte Verbindung zwischen dem Anforderungs- und Umweltmodell dar.

Bei der Planung von Anlagen mit Hilfe der Modellierung und Zuordnung von PPRS wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass mindestens ein Planungsstand vorliegt, bei dem eine grobe Prozessplanung der Prozesse in der Struktur bereits durchgeführt wurde. Demnach besitzen die Prozesse bereits strukturelle Informationen, die für die Planung von Anlagen relevant sind. Somit besteht ebenfalls zwischen den Entitäten Prozess und Struktur eine direkte Verbindung. Dies stellt ebenfalls eine Erweiterung des allgemeinen PPRS Modells nach (Pfrommer, Schleipen und Beyerer 2013) dar.

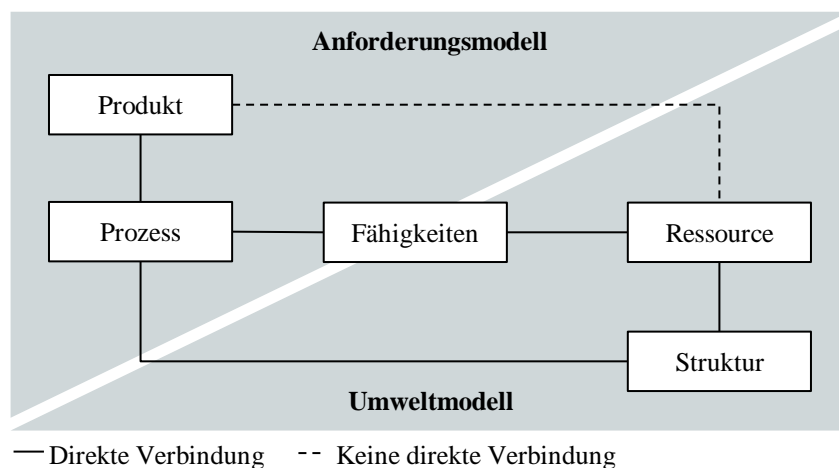


Abbildung 36: PPRS Modell (in Anlehnung an Backhaus und Reinhart 2015)

### Anforderungsmodell

Zur Beschreibung des Anforderungsmodells sollen folgend die einzelnen Entitäten bzgl. Produkt, Prozess und geforderten Fähigkeiten beschrieben werden. Die Beschreibung des Anforderungs- und Umweltmodells stellt innerhalb der Methode dieser Arbeit weiterhin eine manuelle Tätigkeit dar. Daher soll darauf geachtet werden, dass die Beschreibung nur so genau wie nötig erfolgt. Denn je höher der Detaillierungsgrad ist, desto höher ist auch der Beschreibungsaufwand.

Nach (Löffler 2011) kann die Produktstruktur für die Automobilendmontage in Produktportfolio, Produktsegment, Produkt, Komponente, Teilegruppe und Einzelteil unterteilt werden (siehe Kapitel 2.1). Eine derart feine Unterteilung des Produktes ist für die Planung von Anlagenkonzepten jedoch nicht erforderlich. Für die Bestimmung des jeweiligen Fahrzeuges reicht es aus, wenn das Produkt und die Produktvariante beschrieben werden. Ein Produkt kann so z. B. aussagen, um welches Fahrzeugmodell es sich handelt. Mit der Entität Produktvariante kann anschließend bestimmt werden, welche Variante des jeweiligen Modells vorliegt, z. B. ein Fahrzeug mit Linkslenker oder Rechtslenker. Die verschiedenen Fahrzeuge und ihre Varianten auf einer Montagelinie können dadurch vollständig beschrieben werden. Des Weiteren ist eine Unterteilung in Komponente, Teilegruppe und Einzelteil nicht notwendig. In der Automobilendmontage werden die verschiedenen Objekte zumeist über einen Prozess am Fahrzeug montiert. Dabei ist die Komplexität des Objektes nicht von Bedeutung sondern lediglich, ob es sich um ein Bauteil oder ein Verbindungselement handelt.

Für die Beschreibung des Prozesses kann die (DIN 8593-0) zur Beschreibung von Fügefunktionen oder die (VDI 2860) für die Beschreibung von Handhabungsfunktionen verwendet werden. Weitere Ansätze zeigen u. a. (Schmidt 1992) und (Backhaus 2016). Innerhalb dieser Arbeit ist eine Detaillierung des Prozesses in die drei Ebenen Prozess, Teilprozess und Operation gewählt. Eine direkte Übertragung bzw. Verwendung einer bestehenden Prozessdefinition wird dabei nicht verfolgt. Vielmehr soll spezifisch für die Automobilendmontage eine einfach anwendbare Lösung entwickelt werden, die durchaus Teile aus verschiedenen Ansätzen verwenden darf.

*Prozess:* Ein Prozess kann eine oder mehrere verbundene, wertschöpfende Funktionen darstellen. Zudem wird der Prozess lösungsneutral beschrieben und gibt keine Auskunft über den späteren Füge- oder Handhabungsprozess. Mit Hilfe eines Prozesses wird so z. B. ein Bauteil inklusive seiner Verbindungselemente vollständig am Fahrzeug montiert.

*Teilprozess:* Ein Teilprozess entspricht einer Füge- oder Handhabungsfunktion und stellt die kleinste wertschöpfende Funktionalität dar, welche nicht weiter sinnvoll zerlegbar ist. Teilprozesse geben u. a. eine Auskunft über den späteren Fügeprozess wie z. B. Schrauben, Kleben oder Nieten. Weiter ist einem jeden Teilprozess exakt ein einzelnes Verbindungselement oder Bauteil zuzuordnen.

*Operation:* Den kleinsten Funktions- bzw. Handhabungsteil stellt eine Operation dar wie z. B. das Bewegen oder Kontrollieren. Mit Hilfe mehrerer Operationen können Teilprozesse ausgeführt werden.

Die Anforderungen aus Produkt und Prozess sollen folgend entsprechend Ansatz zwei als erforderliche Fähigkeiten beschrieben werden. Diese werden wiederum analog des Ansatzes

drei in elementare und zusammengesetzte Fähigkeiten unterteilt (siehe Abbildung 37). Elementare Fähigkeiten sind entsprechend ihrer Definition den Anforderungen zur Ausführung einzelner Operation zugeordnet und zusammengesetzte Fähigkeiten den Anforderungen zur Ausführung von Teilprozessen. Prozesse selbst stellen lediglich eine Aufzählung mehrerer Teilprozesse dar und erfordern keine weitere Beschreibung in Form einer Fähigkeit.

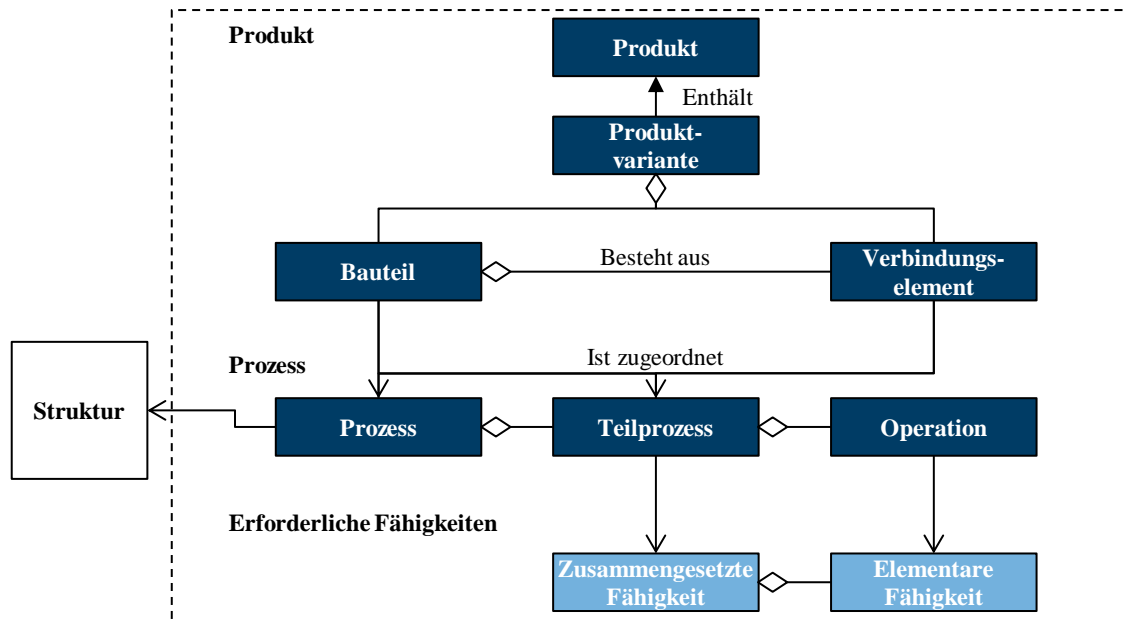


Abbildung 37: Detailsicht Anforderungsmodell Automobilmontage

### Umweltmodell

Das Umweltmodell unterteilt sich in Struktur, Ressource und verfügbare Fähigkeiten (siehe Abbildung 38). Nach dem Ansatz vier ist für die Strukturierung das Referenzmodell nach (Biffl, Lüder und Gerhard 2017) aus Kapitel 2.2 zu verwenden. Hierbei erfolgt eine auf die Montage angepasste Unterteilung in die Ebenen Fertigungsnetzwerk, Fabrik, Montagelinie, Montagelinienabschnitt, Montageeinheit, Montagestation, Funktionsgruppe, Komponente und Konstruktionselement. Wie auch bei dem Anforderungsmodell gilt das Prinzip, ausschließlich notwendige Daten und Informationen zu beschreiben. Die oberen beiden Ebenen Fertigungsnetzwerk und Fabrik sind somit für die Methode dieser Arbeit nicht relevant.

Für die Beschreibung der Struktur sind vor allem Daten und Informationen der Montagelinie und des Montagelinienabschnittes erforderlich. Über diese beiden Ebenen können sowohl wirtschaftliche als auch strukturelle Informationen und Bedingungen beschrieben werden.

Die weiteren Ebenen Montageeinheit, Montagestation, Funktionsgruppe, Komponente und Konstruktionselement stellen jeweils Ressourcen unterschiedlicher Komplexität dar. Die einzelnen Ressourcen sind in Korrelation mit den Ebenen des Prozesses zu betrachten. Die kleinste Ebene des Prozesses stellt eine Operation dar. Für die Ausführung von Operationen sind auf der Seite der Ressource Komponenten erforderlich. Zudem besteht das Ziel der Me-

thode in der Wiederverwendung von Ressourcen, weshalb eine Betrachtung der Ebene Konstruktionselement im Rahmen der Konfiguration von Anlagenkonzepten zu granular und nicht zielführend ist. Die Ebene der Funktionsgruppe besitzt mehrere Komponenten und somit eine zusammengesetzte Fähigkeit. Dies bedeutet, dass die Ebene der Funktionsgruppe über ihre Fähigkeit mit einem oder mehreren Teilprozessen verknüpft ist. Nach (Biffli, Lüder und Gerhard 2017) kann eine Funktionsgruppe jedoch nicht alleine eine vollständige Funktion ausführen und erfordert unterstützend weitere Funktionsgruppen. Welche Funktionsgruppen dies sind wird folgend in Kapitel 8.1.4 dargestellt. Mehrere einzelne Funktionsgruppen stellen wiederum eine Montagestation dar. Eine Montagestation kann somit u. a. einen oder mehrere Prozesse oder auch Teilprozesse ausführen. Analog beinhaltet eine Montageeinheit mehrere Montagestationen und kann somit mehrere Prozesse oder auch mehrere Teilprozesse ausführen. Ausgehend dieser Definition adressiert eine örtliche Bündelung von Anlagen in der Montagelinie (siehe Kapitel 6.1) die Ebene einer Montageeinheit.

Wie auch bei dem Anforderungsmodell werden die Fähigkeiten nach dem Ansatz zwei und drei beschrieben. Im Umweltmodell werden zu den erforderlichen Fähigkeiten aus dem Anforderungsmodell die verfügbaren Fähigkeiten der Ressourcen aufgeführt. Komponenten besitzen damit elementare und Funktionsgruppen zusammengesetzte Fähigkeiten.

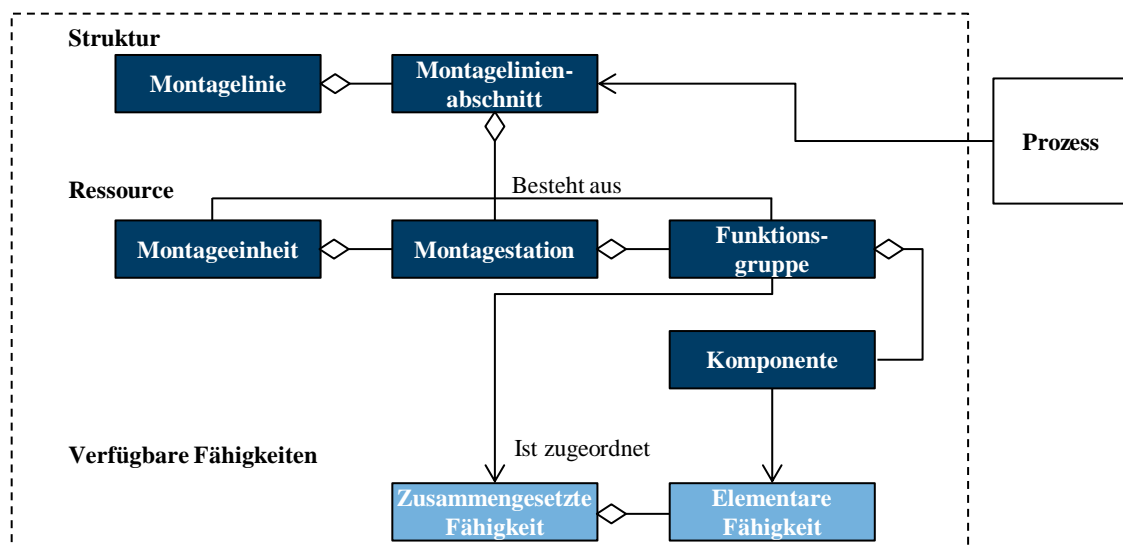


Abbildung 38: Detailsicht Umweltmodell Automobilendmontage

### 8.1.2 Attribute Anforderungsmodell

Für eine weitere Detaillierung des Anforderungsmodells sind die Attribute der Produkte und Prozesse zu identifizieren und zu beschreiben. Dazu soll zunächst eine Detaillierung der Teilprozesse Ein- und Endverschrauben sowie Endverschrauben (siehe Kapitel 2.3.2) erfolgen. Dazu zeigt die Abbildung 39 exemplarisch mögliche Operationen von Schraubprozessen. Die Anordnung der Operationen stellt nur eine grobe Reihenfolge dar. Es ist zu erwähnen, dass zum Teil Operationen kontinuierlich oder auch parallel zu anderen durchgeführt



werden können. Des Weiteren sind nicht für jedes Anlagenkonzept alle aufgeführten Operationen erforderlich.

In Kapitel 2.3.1 wurden die einzelnen Prozessschritte für die Synchronisierung des Roboters mit dem Montagehauptkörper (MHK) beschrieben. Die einzelnen Operationen können diesen Schritten ebenfalls zugeordnet werden. Die Grobpositionierung wird über die Operationen Kontrolle und Bewegen Fahrzeugposition, die Annäherung über die Operationen Kontrolle und Bewegen Fügeposition und der Kontakt über die Operation Ausgleich Positionsdifferenzen realisiert. Abhängig des Anlagenkonzepts und der Anforderungen des Produktes und Prozesses kann jedoch ggf. eine reine Grobpositionierung für die Realisierung eines Schraubprozesses ausreichend sein.

Speziell für das Ein- und Endverschrauben ist häufig die zusätzliche Operation Kontrolle der Lochdeckung erforderlich. Zusätzlich ist für diesen Teilprozess das Werkzeug zu bestücken, z. B. über ein Abpicken, Zuführen oder Magazinieren der Verbindungselemente (siehe Kapitel 2.3.2). Zum Ende des Prozesses muss die Ressource sich in ihre Ausgangsposition für das nächste Fahrzeug bewegen. Im Kontext der Beschreibung der Anforderungen als erforderliche Fähigkeiten stellen Operationen so elementare Fähigkeiten und Teilprozesse zusammengesetzte Fähigkeiten dar.



Abbildung 39: Teilprozesse und Operationen zum Verschrauben von Verbindungselementen

Zur Identifizierung der Attribute des Anforderungsmodells ist ein Ursachen-Wirkungs-Diagramm verwendet worden (siehe Abbildung 40). In diesem sind die erforderlichen Attribute bzgl. Produkt und Prozess für die Auswahl der einzelnen Komponenten der Anlage aufgeführt. Die Attribute aus der Abbildung 40 stellen jedoch eine erste Annahme für Schraubprozesse dar, welche es mit fortlaufender Anwendung der Methode zu erweitern bzw. anzupassen gilt. Die einzelnen Attribute werden noch einmal in dem Anhang 3 detailliert beschrieben.

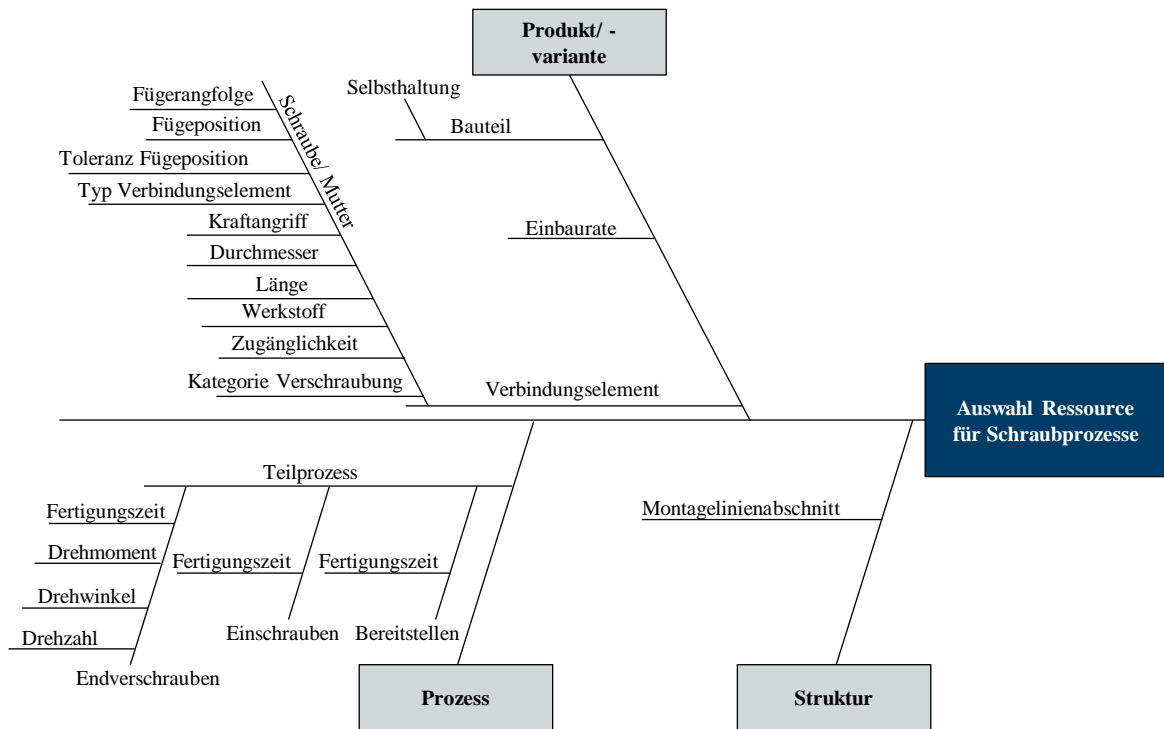


Abbildung 40: Technische Attribute des Anforderungsmodells exemplarisch am Beispiel Schrauben

Für die Definition der elementaren und zusammengesetzten Fähigkeiten sind folgend die Operationen mit den Attributen zu verknüpfen. Hierzu sind exemplarisch die zusammengesetzte Fähigkeit Endverschrauben und die elementare Fähigkeit Kontrolle Schraubparameter in der Abbildung 41 dargestellt. Weitere Abhängigkeiten zwischen den Operationen und Attributen sind in dem Anhang 4 aufgeführt.

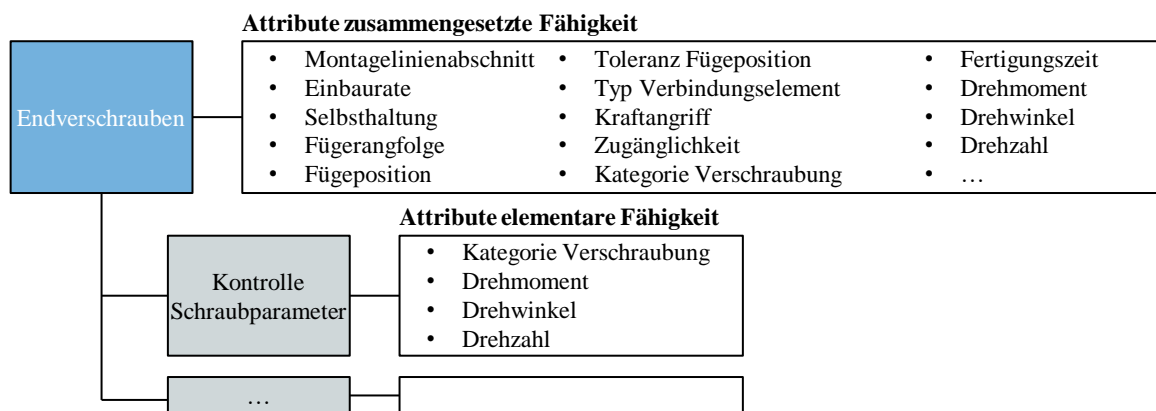


Abbildung 41: Exemplarische Darstellung von Attributen erforderlicher Fähigkeiten

### 8.1.3 Modellierung der Produkt-/ Prozessvarianz

Eine Anforderung an die Methode ist die Berücksichtigung der Varianz aus der Bandbreite an Produkten und Prozessen innerhalb der Automobilendmontage (siehe Kapitel 5.1). Um diese Anforderung zu erfüllen bzw. Forschungsfrage fünf zu beantworten, ist ein Ansatz entwickelt, mit dem die Varianz berücksichtigt werden kann. Den Ansatz hierfür zeigt die Abbildung 42. Zunächst sind die Anforderungen aus Produkt und Prozess zu identifizieren

und in Form von erforderlichen Fähigkeiten an die Ressource zusammenzufassen. Ergänzend sind für die Modellierung der Varianz eines Produktes die verschiedenen Fähigkeiten der jeweiligen Produktvarianten in einer Fähigkeit zusammenzufassen. Hierdurch können weiterhin mit Hilfe einer einzelnen Fähigkeit alle notwendigen Anforderungen bzw. erforderlichen Fähigkeiten der Ressource beschrieben werden. Bei der Auswahl der Ressource hat dies jedoch zur Konsequenz, dass eine Automatisierung nur möglich ist, wenn die Automatisierung eine Flexibilität für die Produkt-/ Prozessvarianz aufweist. Denn Automatisierungen innerhalb der konventionellen Fließfertigung der Automobilendmontage ohne diese Flexibilität können dazu führen, dass weiterhin Prozesse bei einzelnen Produktvarianten manuell durchgeführt werden müssten und es somit zu einer Taktzeitspreizung (siehe (Aisenbrey, Küber und Foith-Förster 2015)) kommen würde. Im Hinblick auf neue Konzepte der Fließfertigung, z. B. einem variablen Takt dem sog. „VarioTakt“ (siehe (Bebersdorf und Huchzermeier 2021)), führt die Automatisierung nur einzelner Produktvarianten nicht bedingt zu einer Taktzeitspreizung. Innerhalb dieser Arbeit liegt der Fokus jedoch weiterhin auf den konventionellen Taktungsprinzipien. In weiterführenden Arbeiten und mit steigender Umsetzung neuer Fließfertigungskonzepte sind auch neue Konzepte innerhalb der Modellierung zu berücksichtigen.

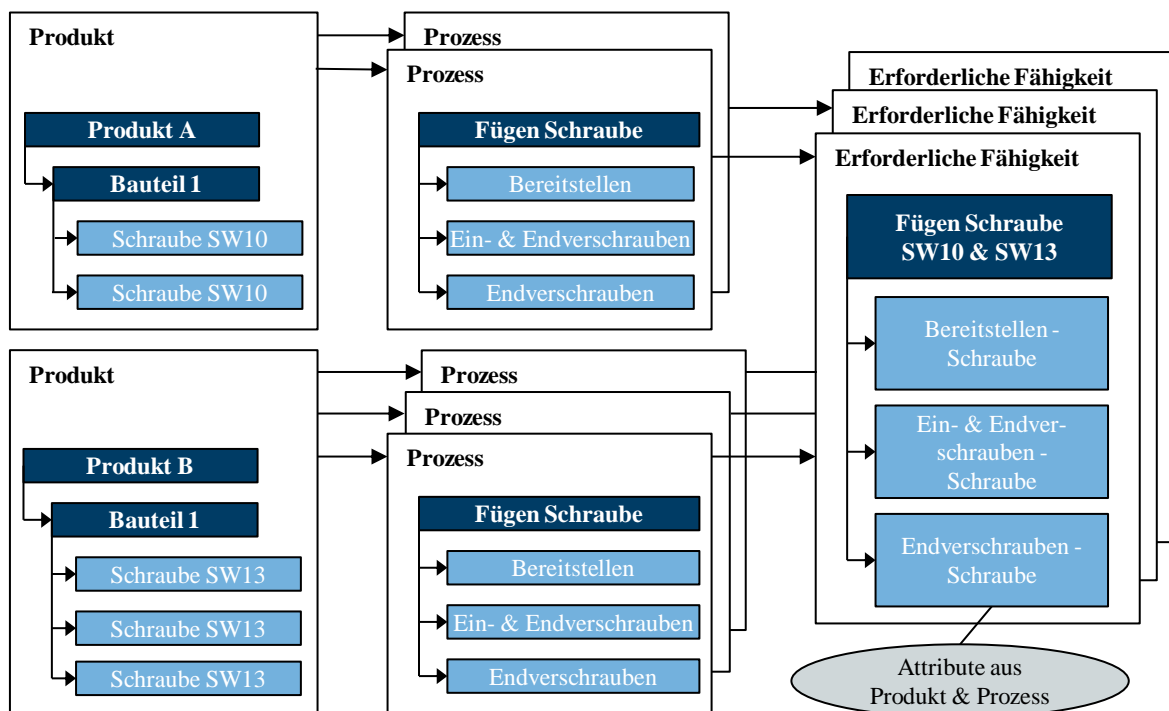


Abbildung 42: Exemplarische Modellierung der Varianz der Anforderungen aus Produkt und Prozess

Damit die einzelnen Fähigkeiten der jeweiligen Produktvarianten in einer Fähigkeit zusammengefasst werden können, müssen die Attribute ebenfalls zusammengefasst werden. Dazu sind Regeln notwendig, die beschreiben, in welcher Form ein Attribut mit einem anderen Attribut zusammengefasst werden kann. Grundsätzlich konnten in dieser Arbeit für die im

vorherigen Kapitel identifizierten Attribute sechs Regeln aufgestellt werden (siehe Anhang 5).

- *Enumeration*, die einzelnen Attribute sind in der zusammengefassten Fähigkeit vollständig aufzuführen. Bei unterschiedlichen Fügepositionen müssen bspw. alle möglichen Fügepositionen im Attribut enthalten sein.
- *Minimum*, der kleinste Wert der Attribute stellt die größte Anforderung an die Ressource dar und ist in der zusammengefassten Fähigkeit zu verwenden.
- *Maximum*, der größte Wert der Attribute stellt die größte Anforderung an die Ressource dar und ist in der zusammengefassten Fähigkeit zu verwenden.
- *Schnittmenge*, spezifisch für die Fügerangfolge ist die Schnittmenge der einzelnen Fügerangfolgen zu bilden.
- *Bereich*, mit dem kleinsten und größten Wert der Attribute ist ein Bereich zu definieren. Die Ressource muss folgend den vollständigen Bereich abdecken können.
- *Summe*, spezifisch für die Einbaurrate ist die Summe der einzelnen Einbauraten zu bilden. Diese ist für die Wirtschaftlichkeitsberechnung der Ressource notwendig.

Mit Hilfe des Kapitels 8.1.3 wurde somit eine Lösung vorgestellt, welche die Beantwortung der Forschungsfrage fünf adressiert. Die Kapitel 8.1.1, 8.1.2 und 8.1.3 stellen zusammengefasst die Beantwortung der Forschungsfrage vier dar.

### 8.1.4 Attribute Umweltmodell

Im Anschluss an die Attribute des Anforderungsmodells sind die Attribute des Umweltmodells zu bestimmen. Dazu werden zunächst die Attribute für die Ebenen der Struktur und anschließend die Attribute der verschiedenen Ebenen von Ressourcen beschrieben.

#### Attribute Struktur

Der Ebene der Montagelinie werden überwiegend Attribute zugeordnet, die zur detaillierten Berechnung der Wirtschaftlichkeit erforderlich sind. Die Berechnung dieser ist jedoch, wie in Kapitel 7.4 beschrieben, nicht Inhalt der Methode dieser Arbeit. Bei dem Montagelinienabschnitt handelt es sich um Informationen, die sich primär auf die Struktur und Fördertechnik beziehen. Attribute des Montagelinienabschnittes wie z. B. die Taktzeit, Art der Fördertechnik oder das Fließprinzip sind während der Konfiguration von Anlagenkonzepten zu berücksichtigen. Attribute wie die Taktanzahl, Taktlänge oder auch Taktbreite stellen hingegen keine direkten Anforderungen dar, sind jedoch für die anschließende Entwicklung eines Integrationskonzepts von Relevanz.

#### Analyse eines generischen Anlagenkonzepts für Schraubprozesse

Wie bereits in Kapitel 8.1.1 beschrieben, kann ein wertschöpfender Prozess wie z. B. ein Teilprozess erst vollständig auf der Ebene einer Montagestation ausgeführt werden, weshalb

folgend für die Beschreibung eines generischen Anlagenkonzepts die Ebene einer Montagestation betrachtet wird. Die Analyse mehrerer Montagestationen für Schraubprozesse bzw. Schraubstationen hat gezeigt, dass sich diese in fünf verschiedene Funktionsgruppen aufteilen lassen (siehe Abbildung 43). Für jede Schraubstation wiederkehrend sind die sog. Muss-Funktionsgruppen wie die Anlagensteuerung und Schutztechnik. Diese sind prozessunabhängig und werden für jede roboterbasierte Automatisierung gefordert. Neben diesen können zwei alternative Automatisierungen gewählt werden. Zum einen die Automatisierung des gesamten Prozesses mit der Funktionsgruppe des Ein- und Endverschraubens sowie der dadurch geforderten Funktionsgruppe des Bereitstellens. Zum anderen die einzelne Automatisierung des Teilprozesses des Endverschraubens mit der Funktionsgruppe des Endverschraubens (siehe Kapitel 2.3.2).

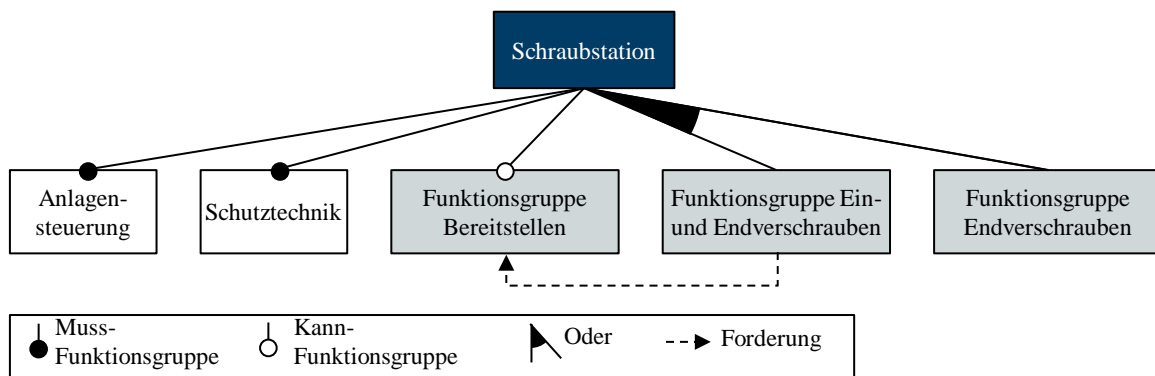


Abbildung 43: Funktionsgruppen einer Schraubstation

### Analyse einer generischen Funktionsgruppe für das Endverschrauben

Die jeweiligen Funktionsgruppen können weiter in Komponenten aufgeteilt werden. Am Bsp. der in Kapitel 2.3 dargelegten Funktionsgruppen sind in der Abbildung 44 exemplarisch mögliche Komponenten dargestellt, mit denen sich die einzelnen Operationen durchführen lassen. Die Kontrolle der Fahrzeugposition kann so u. a. von einem Mitarbeiter, einem Kamerasystem oder auch Sensoren übernommen werden. Das Bewegen des Roboters bzw. des Werkzeugs relativ zur Fahrzeugposition kann über die Reichweite des Roboters, also dem Roboterarm, einer Lineareinheit, einem Manipulator oder auch einer bodengeführten Plattform erfolgen. Das Bewegen zur Fügeposition wird von einem Roboter übernommen, da der Fokus dieser Arbeit auf der roboterbasierten Automatisierung liegt (siehe Kapitel 2.3). Die Kontrolle der Fügeposition kann wieder mit Hilfe von Kamerasystemen optisch erfolgen oder auch taktil über einen Kraft-Momenten-Sensor (KMS).

Abhängig des jeweiligen Anlagenkonzepts, der Synchronisierungsstrategie sowie dem zu verschraubenden Produkt ist es möglich, die Operationen wie z. B. die Kontrolle der Fügeposition, den Ausgleich der Positionsdifferenzen oder auch die Kontrolle des Bauzustands

im Anlagenkonzept außen vorzulassen. Aufgrund der unterschiedlichen Synchronisierungsstrategien ist es in der fähigkeitsbasierten Konfiguration zunächst vorgesehen, die erforderlichen Operationen vorher festzulegen.

Eine Aufschlüsselung der Attribute einer Funktionsgruppe für das Ein- und Endverschrauben ist in dem Anhang 6 in Abbildung 75 dargestellt. Die Attribute zeigen zum Großteil die einzelnen Attribute der in der Funktionsgruppe enthaltenen Komponenten. Mit zunehmender Betrachtung neuer Anlagenkonzepte und Komponenten sind die Attribute stetig zu evaluieren und zu ergänzen. Für die Bestimmung des Risikos der Rekonfiguration der Ebene einer Funktionsgruppe (siehe Kapitel 7.2) sind diese Attribute ebenfalls heranzuziehen.

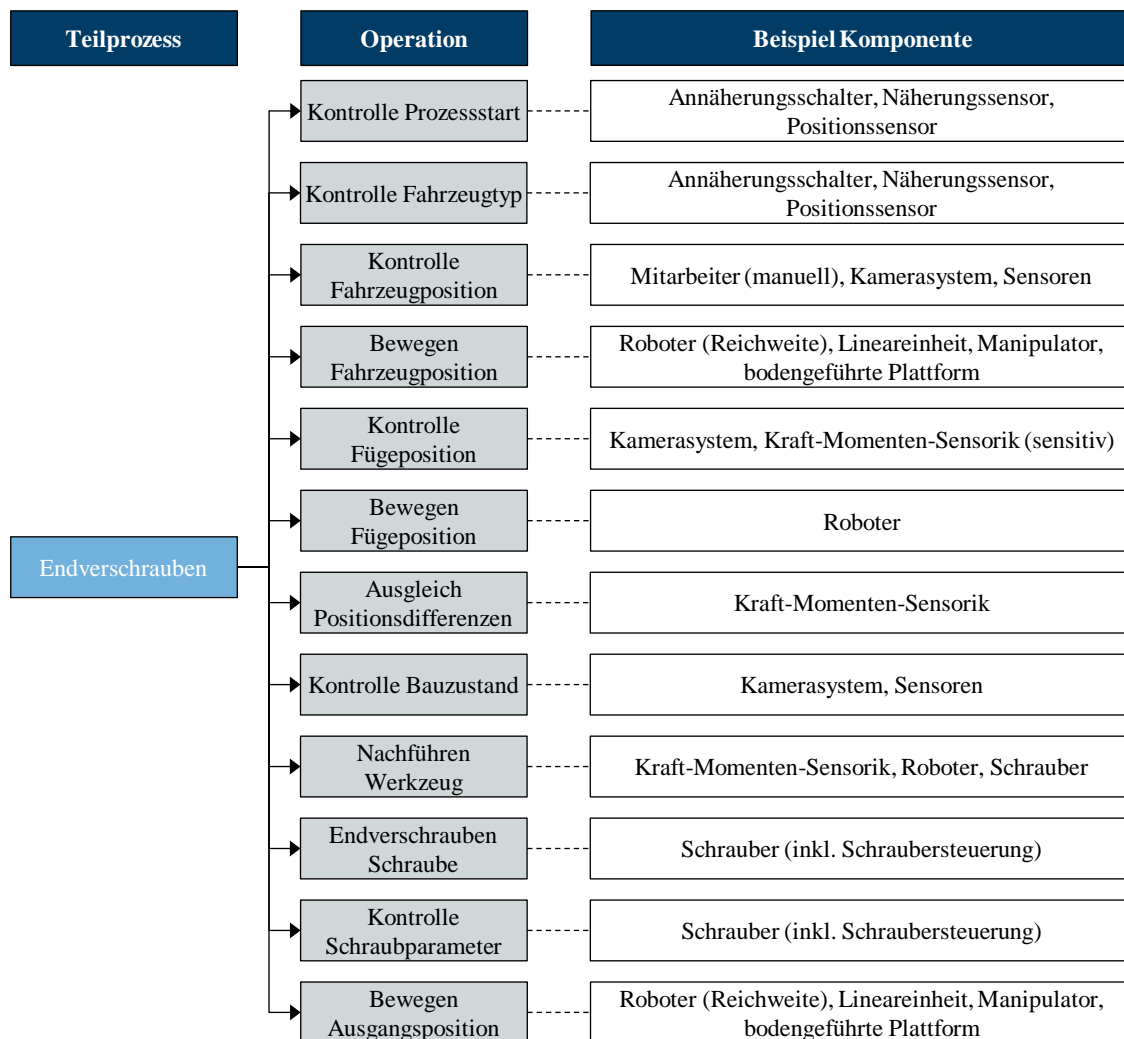


Abbildung 44: Beispiele von Komponenten einer Funktionsgruppe für den Teilprozess Endverschrauben

### Attribute von Komponenten

Die Beschreibung der Attribute von Komponenten soll folgend am Beispiel eines Schraubers und eines Roboters stattfinden. Zu erwähnen ist an dieser Stelle noch einmal, dass das Ziel eine erste grobe Konfiguration von Anlagenkonzepten darstellt. Aus diesem Grund sowie

zur Vereinfachung der Modellierung und des Aufwands (siehe Kapitel 4.3) werden nur Attribute aufgeführt, die für eine grobe Konfiguration als Relevant angesehen werden.

In der Abbildung 45 sind exemplarisch die möglichen Attribute eines Schraubers dargestellt. Für die Identifikation der Attribute wurden die verschiedenen Schraubsysteme aus Kapitel 2.3.2 sowie die Anforderungen bzw. erforderlichen Fähigkeiten aus Kapitel 8.1.2 untersucht. Die Attribute für die Zuordnung der Komponente mit dem Produkt und Prozess sind unter der Kategorie „Zuordnung Produkt & Prozess“ in der Abbildung 45 aufgeführt. Diese Attribute sind zugleich für die Bestimmung des Risikos der Rekonfiguration (siehe Kapitel 7.2) heranzuziehen. Für die spätere Kombination der Komponenten mit anderen Komponenten müssen zusätzlich die Eigenschaften bzw. Attribute der Komponenten bestimmt werden, die mit entsprechenden Attributen der zu kombinierenden Komponenten korrespondieren (Pahl et al. 2007). Daher ist neben den Attributen der Zuordnung ebenfalls eine Beschreibung der Schnittstellen vorzunehmen. Angelehnt an Kapitel 7 sind zusätzlich Attribute einzubeziehen, um eine Bewertung hinsichtlich der Wiederverwendungskriterien zu ermöglichen. Die erste grobe Zuordnung von Komponenten zu Operationen aus Abbildung 44 erfolgt über die elementaren Fähigkeiten des Schraubers. Anschließend sind im Detail die einzelnen Attribute der Komponente zu überprüfen.

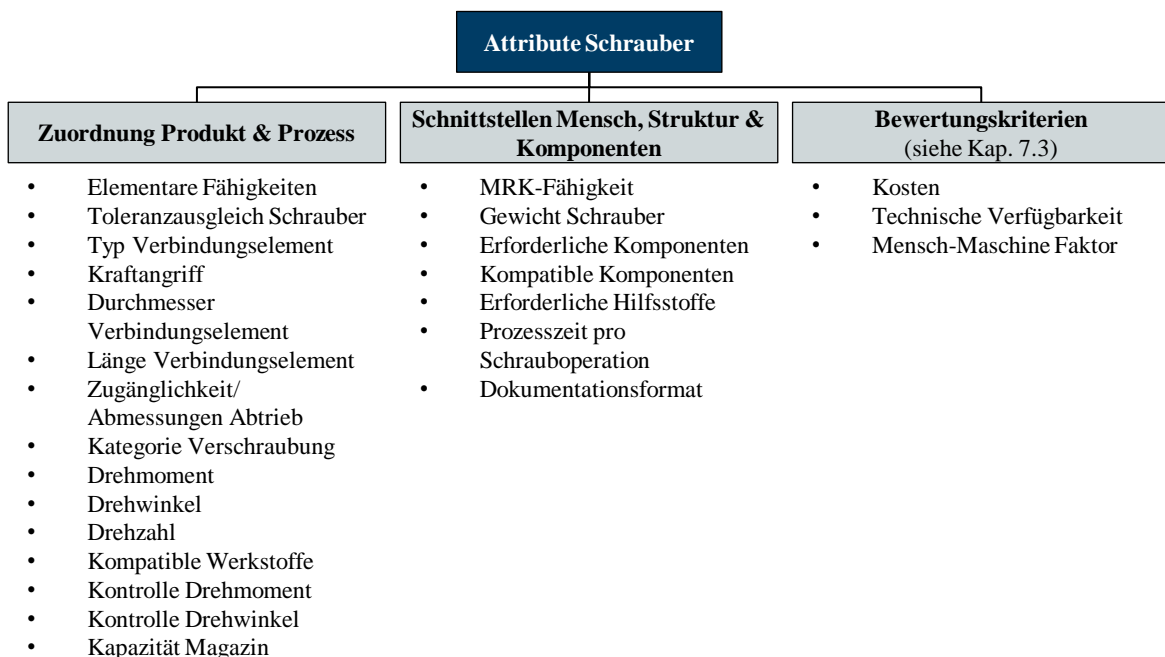


Abbildung 45: Attribute eines Schraubers

Ebenfalls sind die Attribute eines Roboters identifiziert. Hierzu sind verschiedene Roboter, sowohl Leichtbauroboter (siehe z. B. (Universal Robots 2018), (Fanuc 2019) und (Kuka 2016) als auch herkömmliche Industrieroboter untersucht worden. Die Attribute werden in der Abbildung 76 im Anhang 6 aufgeführt. Ein Roboter kann z. B. eine integrierte Kraft-Momenten-Sensorik besitzen. Die genauen Spezifikationen wie der Messbereich oder die

Genauigkeit dieser sind innerhalb eines Attributs mit aufzunehmen. Wird z. B. von einer spezifischen Funktionsgruppe ein Roboter mit einem Kraft-Momenten-Sensor gefordert, so können hierdurch die genauen Eigenschaften des Roboters auf deren Eignung überprüft werden. Des Weiteren können Roboter verschiedene Schutzklassen und Sicherheitsfeatures besitzen. Die entscheidende Frage ist jedoch die, ob ein Roboter das Potential für einen MRK (Mensch-Roboter-Kollaboration) Betrieb besitzt. Bei verschiedenen Leichtbaurobotern ist es z. B. möglich virtuelle Schutzzäune zu definieren, die der Roboter nicht überschreiten kann. Eine andere Lösung zur Erhöhung der Sicherheit von Robotern zeigt u. a. eine druckempfindliche Roboterschutzhaut (siehe (Barnitzke 2021)).

In dem Anhang 6 werden neben dem Roboter zusätzlich mögliche Attribute von Kamerasystemen dargestellt. Mögliche weitere Attribute für Sensoren zeigen (Hompel, Büchter und Franzke 2007, Hompel und Schmidt 2010), deren Relevanz für die Methode dieser Arbeit zu überprüfen ist. Für eine detaillierte Spezifikation der Attribute ist es erforderlich, die verschiedenen Anlagenkonzepte und Kamerasysteme in Versuchen zu erproben. Die Abbildung 77 im Anhang 6 stellt somit ausschließlich einen ersten Stand möglicher Attribute dar.

### **8.2 Fähigkeitsbasierte Konfiguration Anlagenkonzepte**

Nach dem Gesamtkonzept aus Kapitel 6.1 ist nach der Modellierung eine fähigkeitsbasierte Konfiguration von Anlagenkonzepten durchzuführen. Dieses Kapitel zielt damit vor allem auf den zweiten Schritt des Vorgehens der Planungsmethode (siehe Abbildung 46). Nach der dritten Ebene des Schalenmodells aus Kapitel 5.4 stellen sich an den Schritt der Konfiguration von Anlagenkonzepten die folgenden Forschungsfragen:

7. *„Auf welcher Ebene von Produkt, Prozess und Ressource ist die Konfiguration und Optimierung von PPR durchzuführen?“*
8. *„Welche Ähnlichkeiten von Produkt und Prozess sind für die Bündelung mehrerer Prozesse in einer Ressource entscheidend, unter Berücksichtigung der Flexibilität der Ressource?“*
9. *„Wie können die Auswirkungen der Bündelung mehrerer Produkte und Prozesse auf die Ressource während der Zuordnung von PPR berücksichtigt werden?“*
10. *„Wie kann eine Zuordnung und Optimierung von PPR für die Automobilendmontage durchgeführt werden?“*



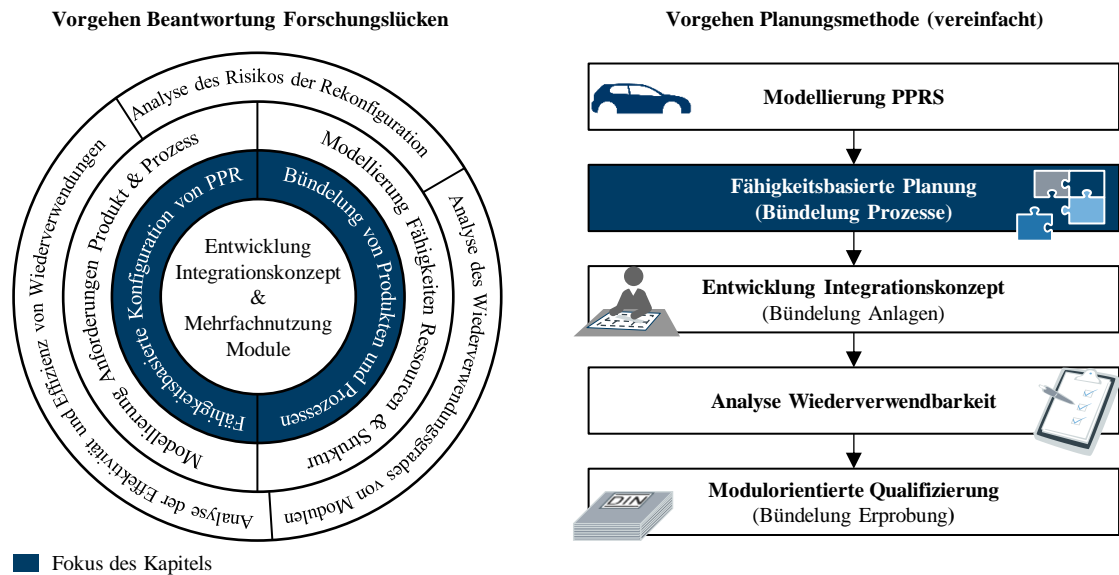


Abbildung 46: Einordnung des Kapitels 8.2 in den Forschungskontext und das Gesamtkonzept

Diese Forschungsfragen sollen folgend sukzessiv in den nächsten Unterkapiteln beantwortet werden. Im ersten Schritt soll dazu die Forschungsfrage sieben beantwortet werden, welche Ebenen von PPR für die Konfiguration und Optimierung von Anlagenkonzepten relevant sind. Anschließend dessen soll zur Beantwortung der Forschungsfrage acht untersucht werden, wie die Ähnlichkeiten von Produkten und Prozessen herausgestellt werden können. Aufbauend hierauf wird für die Beantwortung der Forschungsfrage neun die Bündelung von PPR thematisiert. Ziel hierbei ist es, bei der Bündelung von PPR ebenfalls die Auswirkungen auf die Ressource zu berücksichtigen. Im nächsten Schritt wird die Optimierung der Auswahl von PPR während der Zuordnung von PPRS entsprechend der Forschungsfrage zehn geklärt. Abschließend sollen die einzelnen Ergebnisse für das Detailkonzept der Zuordnung von PPRS in einen sinnvollen Zusammenhang gebracht werden.

### 8.2.1 Relevante Ebenen von PPR für die Zuordnung

In Kapitel 8.1 sind im Anforderungs- und Umweltmodell verschiedene Ebenen von Produkten, Prozessen und Ressourcen modelliert. Jedoch sind nicht alle Ebenen für die Konfiguration von Anlagenkonzepten relevant. Attribute der Ebene Montagelinie sind z. B. primär zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Anlagenkonzepten notwendig. Die Ebene Konstruktionselemente ist hingegen zu granular für eine funktionsorientierte Konfiguration (siehe Kapitel 8.1.1). Für die technische Grobplanung von Anlagenkonzepten stehen somit vor allem die Ressourcenebenen: Montagelinienabschnitt, Montageeinheit, Montagestation, Funktionsgruppe und Komponente im Fokus. Aus den vorherigen Kapiteln ergeben sich zusammengefasst die folgenden Bedingungen:

- Für die Ausführung von wertschöpfenden Prozessen sind nach den Kapitel 8.1.4 Ressourcen der Ebene Montagestation oder Montageeinheit notwendig, womit ein Anlagenkonzept mindestens eine Montagestation abbilden muss.

- Die finale Auswahl von Anlagenkonzepten erfordert, dass zunächst die Auswirkungen auf den Montagelinienabschnitt analysiert wurden (siehe Kapitel 6.1).
- Eine Mehrfachverwendung von Ressourcen/ Modulen erfordert, dass mehrere Prozesse in einer Montagestation gebündelt werden sowie mehrere Montagestationen in dem Montagelinienabschnitt örtlich gebündelt werden.

Resultierend hieraus ist es sinnvoll, möglichst kleine, einfache Anlagenkonzepte auf der Ebene von Montagestationen zu konfigurieren. Dies ermöglicht in der anschließenden Planung des Montagelinienabschnittes eine einfachere und flexiblere Untersuchung verschiedener Kombinationen bzw. Bündelungen von Montagestationen. Die Bündelung mehrerer Montagestationen in dem Montagelinienabschnitt führt so zu komplexen Montageeinheiten.

Charakteristisch für eine Montagestation sind vor allem die prozessausführenden Funktionsgruppen wie z. B. für das Ein- und Endverschrauben oder das Endverschrauben (siehe Kapitel 8.1.4). Varianten von prozessausführenden Funktionsgruppen sind in Kapitel 2.3.1 aufgeführt. Diese besitzen hohe Abhängigkeiten zu dem Montagelinienabschnitt, weshalb es die Auswirkungen der verschiedenen Varianten innerhalb der Planung des Montagelinienabschnittes zu untersuchen gilt. Eine finale Auswahl einer dieser Varianten kann damit erst nach der Entwicklung eines Integrationskonzepts (siehe Kapitel 6.1) stattfinden. Während der Konfiguration von Anlagenkonzepten sind somit optimale Lösungen für jede mögliche Variante der prozessausführenden Funktionsgruppe zu generieren. Die Art der prozessausführenden Funktionsgruppe ist somit vor der Konfiguration festgelegt. Zu optimieren ist daher jeweils die Ebene der Montagestation. Als Optimierungsparameter ist die Ebene der Komponenten zu betrachten. Durch die Auswahl verschiedener Komponenten können somit die Eigenschaften der Funktionsgruppe und Montagestation beeinflusst werden.

In der Abbildung 47 sind hierzu die Beziehungen zwischen den relevanten Ebenen von PPR für die Konfiguration von Anlagenkonzepten dargestellt. Ableitend aus der Betrachtung von den Ressourcenebenen des Umweltmodells sind auf der Seite des Anforderungsmodells vor allem die Ebene des Teilprozesses und der Operation relevant. Diese werden über zusammengesetzte bzw. elementare Fähigkeiten mit der Ebene Funktionsgruppe bzw. Komponente verknüpft. Die Fähigkeiten können dabei sowohl zur Zuordnung als auch zur Kontrolle der Eignung dienen. Eine Verknüpfung der Ebene des Prozesses mit der Ebene der Montagestation ist nicht sinnvoll, da eine Montagestation nicht zwangsweise einen vollständigen Prozess automatisieren kann. Häufig werden nur einzelne Teilprozesse eines Produkts mit einer Montagestation automatisiert. Im Folgenden werden daher Prozesse jeweils auf der Ebene von Teilprozessen und Operationen betrachtet. Die Abbildung 47 adressiert so die Beantwortung der Forschungsfrage sieben.

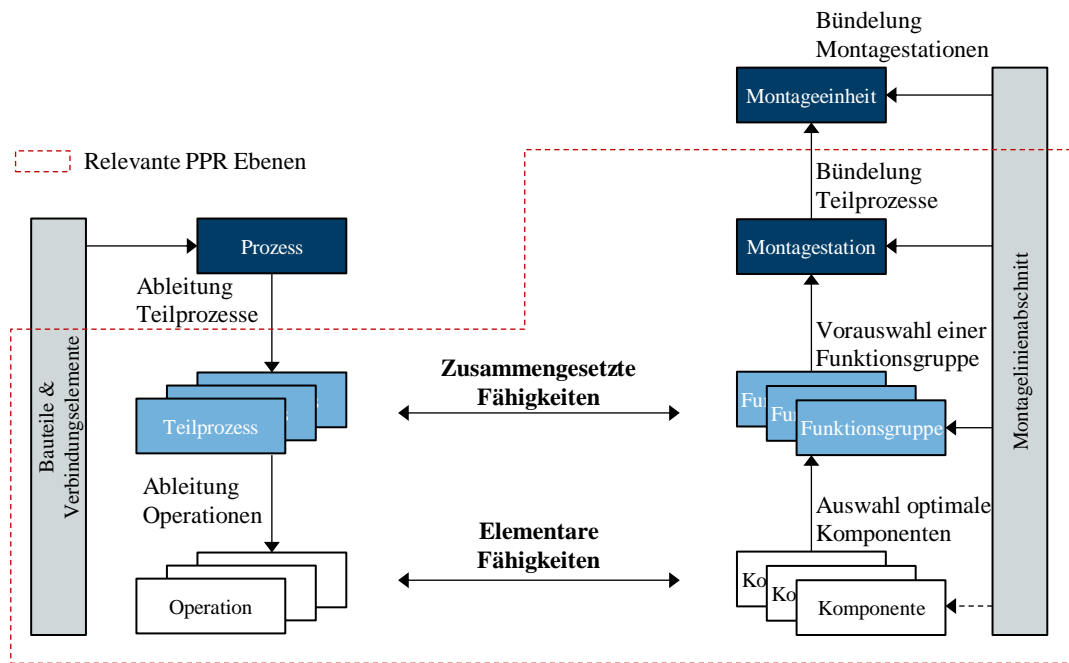


Abbildung 47: Relevante Ebenen von PPR im Kontext der Konfiguration von Anlagenkonzepten

### 8.2.2 Ähnlichkeiten von Produkten & Prozessen

Bei der Bündelung von Teilprozessen in einer Montagestation besteht das Ziel darin, eine möglichst hohe Auslastung der Montagestation zu erreichen. Damit Teilprozesse in einer Montagestation gebündelt werden können, muss diese eine hinreichende Flexibilität für die verschiedenen Teilprozesse aufweisen. Unterstützen soll hierbei eine vorherige Analyse der Ähnlichkeit von Produkten und Prozessen nach der Forschungsfrage acht, sodass möglichst ähnliche Teilprozesse in einer Montagestation gebündelt und die Anforderungen an die Flexibilität der Montagestation gering gehalten werden.

Im ersten Schritt der Analyse der Ähnlichkeit gilt es die bereits vorhandene bzw. inhärente Flexibilität der Ressourcen zu prüfen. Es ist herauszustellen, welche Ressourcen hinsichtlich der Attribute aus Kapitel 8.1.2 eine Flexibilität aufweisen. Ausschließlich in diesen Attributen dürfen sich folgend die gebündelten Teilprozesse unterscheiden. Hierfür sind verschiedene Komponenten hinsichtlich ihrer potentiellen Flexibilität untersucht worden. In der Abbildung 48 sind am Beispiel eines Schraubers, Roboters und Vereinzlers die Attribute dargestellt, hinsichtlich derer eine Ressource eine Flexibilität besitzen kann. Attribute des Anforderungsmodells wie Selbsthaltung, Einbaurrate und Prozesszeit sind für die Untersuchung der Flexibilität nicht relevant. Grund ist, dass eine Eigenschaft wie z. B. die Selbsthaltung eines Bauteils für die singuläre Automatisierung des Schraubprozesses eine Voraussetzung darstellt. Weitere Attribute wie Montagelinienabschnitt und Fügerangfolge müssen zwischen den verschiedenen Teilprozessen übereinstimmen. Können Teilprozesse nicht zur gleichen Zeit ausgeführt werden, so ist eine Bündelung technisch nicht möglich. Anforderung ist so, dass Teilprozesse im Vorfeld der Konfiguration entsprechend ihrer Fügerangfolge vorgruppiert werden.

Bei der Fügeposition kann zwar eine Flexibilität z. B. ausgehend der Reichweite des Roboters bestehen, jedoch ist diese Flexibilität mit Restriktionen versehen. Fügepositionen die sich in einem anderen Bauraum befinden, können ggf. auch bei einer höheren Reichweite des Roboters technisch nicht erreicht werden. Abhängig der Art der Montagestation (siehe Kapitel 2.3.1) ergeben sich die technisch erreichbaren Bauräume. Erfolgt die Synchronisierung z. B. über eine bodengeführte Plattform, so können Bauräume wie der Fahrzeuginnenraum auch bei einer Erhöhung der Reichweite des Roboters nicht erreicht werden. Prozesse sind daher neben der Fügerangfolge ebenfalls nach dem technisch möglichen Bauraum der jeweiligen Funktionsgruppe zu gruppieren. Ein Beispiel einer möglichen Einteilung des Fahrzeuges in Bauräume zeigt z. B. (Weidemann 2017).



Abbildung 48: Attribute mit einer potentiellen Flexibilität

Nach Kapitel 6.1 gilt es während der Konfiguration von Anlagenkonzepten das Kosten-Nutzen-Verhältnis zu optimieren. Damit ist bei der Bündelung von Teilprozessen ebenfalls darauf zu achten, wie stark unterschiedliche Ausprägungen von Attributen die Kosten der Montagestation beeinflussen. Attribute die bei unterschiedlicher Ausprägung zu einer starken Erhöhung der Kosten der Montagestation führen, sollen daher angelehnt an die Clusteranalyse aus Kapitel 4.4 als Proximitätsmaß für die Ähnlichkeit bzw. Unähnlichkeit herangezogen werden. Im zweiten Schritt soll hierfür mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse untersucht werden, welche Attribute einen schwachen bzw. starken Einfluss auf die Kosten der Montagestation besitzen. In der Tabelle 8 sind die Attribute bzgl. ihres Einflusses auf die Kosten der Montagestation gewichtet dargestellt. Bei den Montagestationen für Schraubprozesse wird dabei in Anlehnung an die Unterteilung von Schraubprozessen nach Kapitel 2.3.2 und Kapitel 8.1.2 in Montagestationen für das Endverschrauben und Montagestationen für das Ein- und Endverschrauben differenziert. Die erforderlichen Maßnahmen bei einer Unähnlichkeit von Attributen unterscheiden sich zum Teil stark zwischen diesen beiden Varianten.

Es wird angenommen, dass die Prozesse bereits entsprechend ihrer Fügerangfolge und Fügeposition vorgruppiert wurden. Unterschiedliche Fügepositionen der Schraubprozesse in-

nerhalb einer Gruppe besitzen somit einen schwachen Einfluss auf die Kosten. Eine Maßnahme wäre es den Roboter gegen einen Roboter mit einer höheren Reichweite zu tauschen. Dies führt jedoch nicht zu einer starken Erhöhung der Kosten der Montagestation. Die Toleranz der Fügeposition besitzt hingegen einen starken Einfluss auf die Kosten. Um Toleranzen des Produkts oder der Fördertechnik ausgleichen zu können, ist zu prüfen, bis zu welchem Maß das Werkzeug ausgehend seiner konstruktiven Gestaltung prozesssicher fügen kann. Stellt sich die Toleranz der Fügeposition für das Werkzeug als zu ungenau heraus, können über den Roboter und mit Hilfe einer Kraft-Momenten-Sensorik sensitive Suchfahrten durchgeführt werden (Kuka 2016). Hierbei wird mehrmals versucht durch leichte Korrekturen der Position des Werkzeugs das Verbindungselement zu fügen (Schröter 2018). Eine weitere Möglichkeit stellt der Einsatz von Kamerasystemen dar. Mit Hilfe dieser können auch sehr ungenaue Fügepositionen erkannt und Verbindungselemente gefügt werden. Vor allem letztere Lösung geht jedoch mit einer starken Erhöhung der Kosten der Montagestation einher. Das Attribut Toleranz Fügeposition wird daher mit einem starken Einfluss auf die Kosten gekennzeichnet. Für die spätere Konfiguration von Anlagenkonzepten sind Bereiche zu definieren, bis wohin ein Toleranzausgleich mittels Werkzeug, sensitiver Suchfahrten, Kamerasystemen und anderer Lösungen möglich ist. Die Definition dieser Bereiche setzt jedoch Expertenerfahrungen bzw. praktische Erprobungen mit den jeweiligen Komponenten voraus.

Tabelle 8: Sensitivitätsanalyse - Einfluss der Attribute auf die Kosten einer Montagestation

| Attribute               | Maßnahmen<br>Montagestation: Ein- & Endverschrauben (rot) | Maßnahmen<br>Montagestation:<br>Endverschrauben (blau)  | Kein Einfluss | Schwacher Einfluss | Starker Einfluss |
|-------------------------|---|---|---------------|--------------------|------------------|
| Fügeposition            | Anpassung Roboter   |   |               | ●●                 | ●●               |
| Toleranz Fügeposition   | Zusätzliche Sensorik z. B. Kamerasystem                   |   |               |                    | ●●               |
| Typ Verbindungselement  | Zusätzliches Werkzeug & Bereitstellungssystem             | /   |               | ●●                 | ●●               |
| Kraftangriff            | Zusätzliches Werkzeug/ Werkzeugwechselsystem              |   |               |                    | ●●               |
| Durchmesser             | Zusätzliches Werkzeug & Bereitstellungssystem             | /   | ●●            |                    | ●●               |
| Länge                   | Zusätzliches Werkzeug & Bereitstellungssystem             | /   | ●●            |                    | ●●               |
| Werkstoff               | Geringere Auswahl an Werkzeugen                           | /   | ●●            |                    | ●●               |
| Zugänglichkeit          | Anpassung Werkzeug  |   |               | ●●                 | ●●               |
| Kategorie Verschraubung | /   | Anpassung Werkzeug & zusätzliches Bereitstellungssystem |               | ●●                 | ●●               |
| Drehmoment              | Anpassung Werkzeug  |   |               | ●●                 | ●●               |
| Drehzahl                | Anpassung Werkzeug  |   |               | ●●                 | ●●               |
| Drehwinkel              | Anpassung Werkzeug  |   |               | ●●                 | ●●               |

Unterscheiden sich die einzelnen Kraftangriffe der Verbindungselemente, ist i. d. R. ein zusätzliches Werkzeug und ein Werkzeugwechselsystem oder ein zusätzliches Werkzeug am Endeffektor für jede Art von Kraftangriff einzuplanen. Dies trifft auf beide Montagestationsvarianten zu. Hingegen besteht bei einer Unähnlichkeit der Durchmesser oder der Längen des Verbindungselements ausschließlich bei der Variante des Ein- und Endverschraubens ein Handlungsbedarf. Für die Zuführung der neuen Schraube ist ein zusätzliches Bereitstellungssystem sowie ggf. eine Anpassung oder ein zusätzliches Werkzeug erforderlich. Umgekehrt besteht bei unterschiedlichen Kategorien der Verschraubungen ausschließlich bei der Variante Endverschrauben ein Handlungsbedarf. Wird einer Gruppe von Teilprozessen der Kategorie A oder B ein weiterer Teilprozess der Kategorie C hinzugefügt, ist für diesen Teilprozess das Werkzeug anzupassen und die Montagestation um ein Bereitstellungssystem zu erweitern. Bei Attributen wie Drehmoment, Drehwinkel oder Drehzahl ist i. d. R. ausschließlich eine Anpassung des Werkzeuges notwendig. Vorausgesetzt die Kräfte und Momente von übrigen Ressourcen wie z. B. dem Roboter können aufgenommen werden, ergibt sich somit ein eher schwacher Einfluss auf die Kosten.

Für Montagestationen bzgl. der Teilprozesse des Endverschraubens werden folgend die Attribute Toleranz Fügeposition, Kraftangriff und Kategorie Verschraubung als Proximitätsmaße angesehen. Es sind Gruppen zu bilden, in denen alle Teilprozesse hinsichtlich dieser Attribute identische Ausprägungen besitzen. Falls eine Komponente wie z. B. ein Werkzeug eine Flexibilität für mehrere Kraftangriffe besitzt, können die betreffenden Kraftangriffe als identisch angesehen werden und ebenfalls in einer Gruppe zusammengefasst werden. Für Montagestationen des Ein- und Endverschraubens gilt gleiches, jedoch sind hierbei Attribute Toleranz Fügeposition, Typ Verbindungselement, Kraftangriff, Durchmesser und Länge als Proximitätsmaße anzusehen.

Das Ziel besteht zusammengefasst in der Gruppierung von Teilprozessen mit identischen Proximitätsmaßen. Die Konfiguration von Anlagenkonzepten ist anschließend jeweils für eine spezifische Gruppe ähnlicher Teilprozesse im Einzelnen durchzuführen. In diesem Kontext stellt sich auch die Anwendung eines Verfahrens der Clusteranalyse (siehe Kapitel 4.4) als ungeeignet heraus. Denn die Stärke dieser besteht darin, Objekte mit identischen Merkmalen mit weiteren Objekten ähnlicher aber nicht identischer Merkmale zu fusionieren.

### **8.2.3 Bündelung von Produkten und Prozessen**

Durch die vorherige Analyse der Ähnlichkeit von Teilprozessen aus Kapitel 8.2.2 kann davon ausgegangen werden, dass Gruppen mit ähnlichen Schraubprozessen vorliegen. Die Schraubprozesse einer einzelnen Gruppe können jedoch weiterhin zum Teil unterschiedliche Attribute besitzen, da bei einer potentiellen Flexibilität einer Komponente verschiedene Attribute als ähnlich angesehen werden. Folgend gilt es gemäß der Forschungsfrage neun zu

klären, wie mehrere Schraubprozesse gebündelt und dabei die Auswirkungen auf die Montagestation berücksichtigt werden können.

Die Bündelung von Teilprozessen kann allgemein mit dem Prinzip der Clusteranalyse aus Kapitel 4.4 assoziiert werden, bei dem ähnliche Objekte fusioniert werden sollen. Speziell bei der Bündelung von Teilprozessen soll das Kosten-Nutzen-Verhältnis der Montagestation optimiert werden. Daher gilt es die Auswirkungen auf dieses Verhältnis während der Bündelung zu berücksichtigen. Idee ist es inkrementell zu untersuchen, wie sich das Kosten-Nutzen-Verhältnis einer Montagestation bei Erweiterung um einen Teilprozess verändert. Damit ganzheitlich alle Teilprozesse berücksichtigt werden und eine Erweiterung ausgewählt werden kann, bedeutet dies, dass jede mögliche Teilprozessenerweiterung für die Montagestation untersucht werden muss. Denn mit jedem zusätzlichen Teilprozess ändern sich auch die Anforderungen an die Montagestation. Daher ist für jede mögliche Erweiterung die Montagestation hinsichtlich der neuen Produkt- und Prozessanforderungen anzupassen und zu optimieren. Die Erweiterung die anschließend zu der größten Verbesserung der Montagestation führt, ist dieser und der bestehenden Bündelung an Teilprozessen hinzuzufügen. Mit der neuen Montagestation und der neuen Bündelung an Teilprozessen ist folgend iterativ zu prüfen, ob die Erweiterung um einen Teilprozess zu einer weiteren Verbesserung führt (siehe Abbildung 49). Als Abbruchkriterium der Iteration steht die technisch mögliche Taktzeit. Die von der Montagestation notwendige Zeit zur Ausführung der Teilprozesse darf diese Taktzeit nicht überschreiten. Sollte keine der untersuchten Erweiterungen zu einer Verbesserung der Montagestation führen, gilt es ebenfalls die Iteration abubrechen. Zum Ende ist der Teilprozess auszuwählen, der zu der Montagestation mit dem besten Kosten-Nutzen-Verhältnis führt.

Verglichen mit dem Verfahren der Clusteranalyse kann das Prinzip mit dem agglomerativen hierarchischen Verfahren gleichgesetzt werden, bei dem zunächst jedes Objekt im Einzelnen betrachtet und schrittweise mit einem weiteren Objekt fusioniert wird. Als Fusionierungsverfahren wird weniger eines der in Kapitel 4.4 aufgeführten Beispiele verwendet. Viel mehr erfolgt die Fusionierung abhängig der größten Verbesserung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses der Montagestation. Die optimale Clustergröße ergibt sich im Anwendungsfall der Bündelung abhängig des Abbruchkriteriums, der Überschreitung der Taktzeit, und muss nicht subjektiv bestimmt werden.

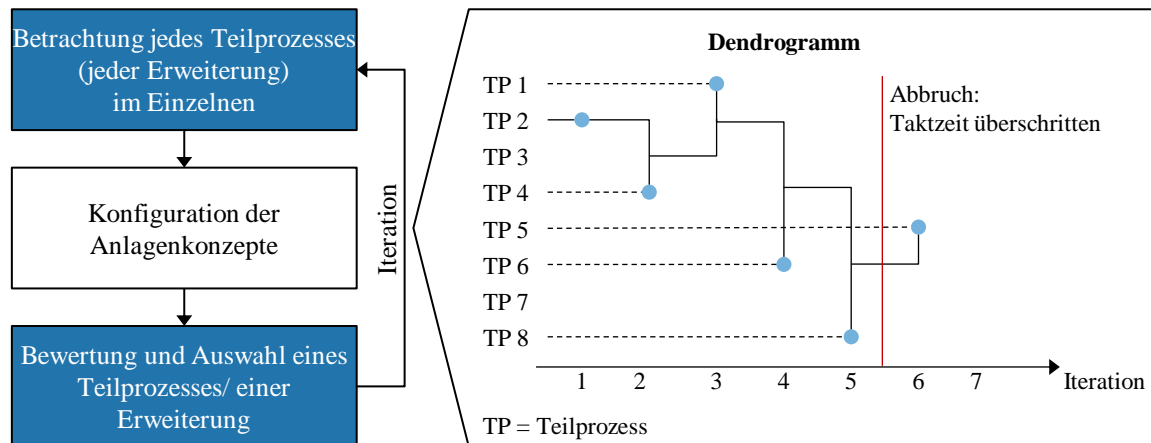


Abbildung 49: Vorgehen zur Bündelung von Teilprozessen in einer Montagestation

Mit dem beschriebenen Verfahren zur Bündelung von Teilprozessen können die Auswirkungen auf das Kosten-Nutzen-Verhältnis auf die Montagestation einer jeden Erweiterung granular analysiert werden. Jedoch besitzt das Verfahren auch Schwächen. Die Lösung der Bündelung ist sehr stark von der Auswahl der ersten Iteration abhängig. Stellt der erste Prozess im späteren einen Ausreißer zu den anderen gebündelten Teilprozessen dar bzw. sind alle Teilprozesse bis auf den Ersten identisch, dann sollte geprüft werden, ob ohne den ersten Teilprozess das Kosten-Nutzen-Verhältnis der Montagestation verbessert werden kann. Dies ist der Fall, wenn:

- der erste Teilprozess in der Bündelung zu der größten Flexibilitätsanforderung führt und durch diesen kostenintensive Komponenten ausgewählt wurden oder
- anstelle des ersten Prozesses andere identische Teilprozesse, die zu keiner Erhöhung der Flexibilitätsanforderung führen, aufgrund der hohen Prozesszeit nicht gebündelt werden konnten.

Um die beschriebenen Fälle auszuschließen, kann das Vorgehen der Bündelung für verschiedene Startprozesse durchgeführt werden. Dies erhöht jedoch den Aufwand der Konfiguration. Im Rahmen der Methodenanwendung dieser Arbeit soll daher zunächst die Anzahl an möglichen Teilprozessen, die als Startprozesse für eine Bündelung in Frage kommen, überprüft werden.

Damit für die gebündelten Teilprozesse eine fähigkeitsbasierte Konfiguration von Anlagenkonzepten durchgeführt werden kann, sind die einzelnen Fähigkeiten, seien es zusammengesetzte oder elementare Fähigkeiten, in einer Fähigkeit zusammenzufassen. Hierfür sind bereits in Kapitel 8.1.3 Regeln für die Zusammenfassung von Fähigkeiten abgeleitet, die an dieser Stelle ebenfalls zu verwenden sind. Die resultierende Fähigkeit beschreibt folgend die Flexibilitätsanforderung an die Montagestation (siehe Abbildung 50).



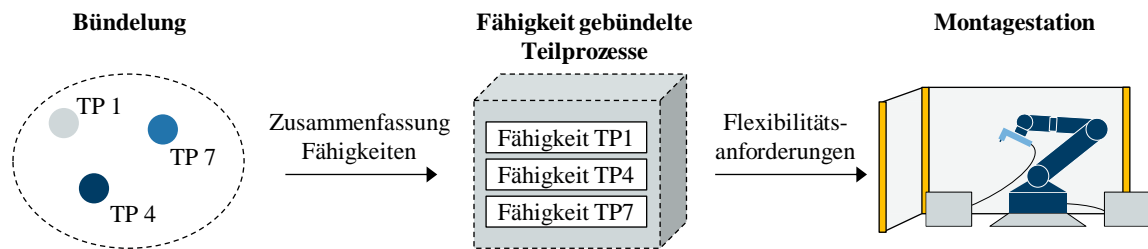


Abbildung 50: Zusammenfassung der Fähigkeiten von gebündelten Teilprozessen (exemplarisch)

### 8.2.4 Zuordnung und Optimierung von PPR

Nachdem das Vorgehen der Bündelung von Teilprozessen bestimmt wurde, ist folgend zu klären, wie eine Zuordnung bzw. Optimierung von PPR durchgeführt werden kann. Zur Beantwortung der Forschungsfrage zehn ist das Optimierungsverfahren im Detail zu bestimmen. Folgende Ausgangssituation wird entsprechend der vorherigen Kapitel angenommen:

- Zuordnung erfolgt für eine bestimmte Funktionsgruppe. Die Ebene der Montagestation ist durch Auswahl geeigneter Komponenten zu optimieren (siehe Kapitel 8.2.1).
- Während der Zuordnung sind notwendige Funktionsgruppen für die Bereitstellung, Sicherheitstechnik und Steuerung zu berücksichtigen (siehe Kapitel 8.1.4).
- Zu optimieren ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis der Montagestation (siehe Kapitel 6.1 und 7.4).
- Die Bündelung und Zuordnung erfolgt auf Basis von Gruppen mit ähnlichen Teilprozessen (siehe Kapitel 8.2.2 und 8.2.3).
- Fähigkeiten beschreiben ganzheitlich die Flexibilitätsanforderungen zur Automatisierung eines jeden Teilprozesses einer Bündelung (siehe Kapitel 8.2.3).

Neben der Bestimmung der optimalen Montagestation gilt es, die erforderliche Prozesszeit zur Ausführung der gebündelten Teilprozesse zu ermitteln. Denn diese wird gleichzeitig als Abbruchkriterium für die Bündelung von Teilprozessen benötigt (siehe Kapitel 8.2.3). Eine Reduzierung dieser würde damit gleichzeitig das Potential erhöhen, weitere Teilprozesse in der Montagestation bündeln zu können. Daher soll im Anschluss der Optimierung der Montagestation eine Optimierung der Prozesszeit erfolgen.

#### Zuordnung und Optimierung der Montagestation

Die Zuordnung und Optimierung stellt allgemein ein kombinatorisches Optimierungsproblem dar (siehe (Domschke et al. 2015)), bei dem für erforderliche Fähigkeiten seitens des Anforderungsmodells verfügbare Fähigkeiten seitens des Umweltmodells auszuwählen sind. Die direkte Zuordnung der Fähigkeiten erfolgt, wie in Kapitel 8.1 beschrieben, über eine eindeutige Beschreibung der erforderlichen und verfügbaren Fähigkeiten. Neben der Prüfung der Fähigkeiten sind jedoch zahlreiche Bedingungen zu berücksichtigen (siehe Tabelle 9). Allgemein ergeben sich Bedingungen zwischen:

- Erforderlichen und verfügbaren Fähigkeiten

- Montagelinienabschnitt (Struktur) und der Montagestation
- Ressourcen einer Montagestation

Optional können zusätzlich die Bewertungskriterien aus Kapitel 7.1.2 als zusätzliche Bedingungen herangezogen werden. Bedingung könnte z. B. sein, dass die technische Verfügbarkeit einer einzelnen Komponente mindestens einen bestimmten Wert besitzen muss.

Für die Konfiguration der Anlagenkonzepte sind Bedingungen und Regeln aufzustellen, mit Hilfe derer Erfahrungen und Wissen aus Erprobungen berücksichtigt werden können (siehe Kapitel 4.3). In der Tabelle 9 sind hierzu exemplarisch Beispiele von Bedingungen zwischen Schraubprozessen, Schrauber und Roboter mit Hilfe einer Entscheidungstabelle aufgeführt. Abhängig der Erfüllung der Regeln ergeben sich Aktionen, welche innerhalb der Zuordnung durchzuführen sind. Besitzt z. B. analog der Regel R02 der Schrauber nicht den passenden Drehmomentbereich für den Schraubprozess, dann ist die Konfiguration unzulässig und es ist ein neuer bzw. anderer Schrauber auszuwählen. Die Regeln sind zudem abhängig der jeweiligen Variante der Funktionsgruppe und der einhergehenden Synchronisierungsstrategie (siehe Kapitel 2.3.1). Eine Funktionsgruppe bei der die Synchronisierung über eine mechanische Kopplung mit Hilfe eines Manipulators erfolgt (siehe Kapitel 2.3.1), besitzt aufgrund ihrer mechatronischen Eigenschaften andere Bedingungen als eine Funktionsgruppe bei der die Synchronisierung geregelt über die Reichweite erfolgt. Im Rahmen dieser Arbeit handelt es sich speziell um die Wiederverwendung von Ressourcen. Je höher die Wissensbasis mit Erfahrungen aus Erprobungen oder dem Betrieb der Ressourcen ist, desto qualitativere Ergebnisse können mit Hilfe der Methode erreicht werden. Bei der Definition der Bedingungen und Regeln ausgehend von Erfahrungen und des Wissens kann in diesem Sinne auch von einem Expertensystem gesprochen werden (siehe Kapitel 4.3.2), ausgehend dessen die Konfiguration von Anlagenkonzepten erfolgt.

Tabelle 9: Beispiele von Bedingungen für die Konfiguration von Schraubstationen

| Bedingungen  | Regeln   |      |      |      |      |      |
|--|----------|------|------|------|------|------|
|  | R01      | R02  | R03  | R04  | R05  | R06  |
| Drehmoment des Prozesses befindet sich innerhalb des Drehmomentbereichs des Schraubers | Ja       | Nein | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   |
| Drehmoment Prozess $\leq$ Drehmoment Roboter   | Ja       | Ja   | Nein | Ja   | Ja   | Ja   |
| Kraftangriff Verbindungselement = Kraftangriff Schrauber                               | Ja       | Ja   | Ja   | Nein | Ja   | Ja   |
| Gewicht Schrauber $\leq$ Traglast Roboter  | Ja       | Ja   | Ja   | Ja   | Nein | Ja   |
| Schrauber und Roboter sind miteinander kompatibel                                      | Ja       | Ja   | Ja   | Ja   | Ja   | Nein |
| ...  | ...      | ...  | ...  | ...  | ...  | ...  |
|  | Aktionen |      |      |      |      |      |
| Konfiguration als zulässige Lösung definieren  | X        |      |      |      |      |      |
| Konfiguration als unzulässige Lösung definieren  |          | X    | X    | X    | X    | X    |
| Neuen Schrauber auswählen  |          | X    |      | X    |      |      |
| Neuen Roboter auswählen  |          |      | X    |      |      |      |

Eine der Bedingungen ist, dass die Komponenten miteinander kompatibel sind. Im Hinblick auf eine steigende Anzahl an verfügbaren Varianten von Komponenten und Funktionsgruppen (siehe Kapitel 1) erhöht sich auch die Anzahl an möglichen Kombinationen. Der numerische Aufwand zur Auswahl einer exakten Lösung ist folgend nur mit hohem Rechenaufwand möglich. Um einen akzeptablen Rechenaufwand zu erhalten sollen daher heuristische Lösungsansätze für die Optimierung verwendet werden. Hierbei ist zu erwähnen, dass in dieser Arbeit der Fokus nicht auf der Suche des Besten, sondern eines geeigneten Optimierungsverfahrens liegt. Wie in (Domschke et al. 2015) beschrieben bieten Heuristiken jedoch keine Garantie, dass das Optimum gefunden wurde. Sie stellen lediglich eine gute zulässige Lösung dar. Damit speziell für das Zuordnungsproblem dieser Arbeit eine gute zulässige Lösung gefunden werden kann, soll die Optimierung in zwei Schritten erfolgen. Im ersten Schritt soll innerhalb eines Eröffnungsverfahrens eine erste zulässige Lösung gefunden werden. Diese soll anschließend in einem lokalen Such- bzw. Verbesserungsverfahren weiter optimiert werden.

### Eröffnungsverfahren

Vereinfacht wird die Zuordnung von PPR folgend mit dem Schema eines morphologischen Kastens assoziiert (siehe Abbildung 51), angelehnt an (Zwicky 1966). So lässt sich durch Kombination einzelner Teillösungen eine Gesamtlösung bzw. ein Anlagenkonzept konfigurieren. Für jede Operation bzw. Zeile ist dabei eine passende Komponente bzw. Spaltenlösung auszuwählen. Im Detail erfolgt die Zuordnung hierbei mit Hilfe der erforderlichen und verfügbaren Fähigkeiten. Um folgend die Kompatibilität der einzelnen Komponenten zu beschreiben, bietet es sich nach (Schuh 2012) an, eine Konfigurationsmatrix zu verwenden, bei der die zulässigen und unzulässigen Kombinationen dargestellt werden. Wird nun eine Komponente ausgewählt, schließen sich aufgrund dieser Konfigurationsmatrix andere Komponenten für andere Zeilen aus. Abhängig der Reihenfolge und der Auswahl werden unter Berücksichtigung der Konfigurationsmatrix immer mehr Komponenten aufgrund unzulässiger Kombinationen ausgeschlossen. Bei der Auswahl von Komponenten trifft man somit direkt auf die Fragestellung, für welche Operation als erstes eine Komponente ausgewählt werden soll.

Um die Kosten des Anlagenkonzepts möglichst gering zu halten, bietet es sich an, Komponenten deren Alternativen bzw. deren Ausschluss zu einem hohen Anstieg der Kosten führen als erstes auszuwählen. Somit soll vermieden werden, dass diese Komponenten im späteren Verlauf aufgrund von Bedingungen und der Kompatibilität ausgeschlossen werden. Die Reihenfolge der Auswahl von Komponenten für Zeilen soll dadurch abhängig der Kostendifferenz zwischen den Komponenten einer Zeile (Zeilenlösungen) bestimmt werden. Folgend ist für die Zeile mit der größten Differenz eine Auswahl einer Komponente zu treffen. Abhängig dieser Auswahl sowie der Kompatibilität der ausgewählten Komponente sind an-

schließlich unzulässige Kombinationen auszuschließen. Somit sind nach jedem Schritt erneut die Differenzen der Zeilenlösungen mit den übrigen zulässigen Komponenten zu bilden und erneut eine Auswahl für die Zeile mit der größten Differenz zu treffen. Das Vorgehen ist zu wiederholen, bis auch für die letzte Operation eine Komponente ausgewählt wurde. Tritt die Situation ein, dass durch Auswahl einer Komponente für eine Operation für andere noch offene Operationen folgend keine zulässige Komponente mehr existiert, dann ist es notwendig im Vorgehen zurückzuspringen. Das beschriebene Vorgehen ist im Anhang in Kapitel 7 in Abbildung 78 im Detail dargestellt und soll im Rahmen der Zuordnung als Eröffnungsverfahren angewendet werden.

Um ganzheitlich die Auswirkungen der Auswahl einer Komponente zu berücksichtigen, sollen alle Komponenten einer Montagestation in einem einzigen morphologischen Kasten aufgeführt werden. Komponenten der Funktionsgruppe für das Ein- und bzw. oder Endverschrauben, der Funktionsgruppe Bereitstellen sowie der Funktionsgruppen für Schutztechnik und Anlagensteuerung sind damit zusammen zu betrachten. Sollten Operationen bzw. die dazugehörigen Komponenten nicht benötigt werden, ist dies über Regeln und Bedingungen für die Zuordnung zu berücksichtigen (siehe z. B. Tabelle 9).

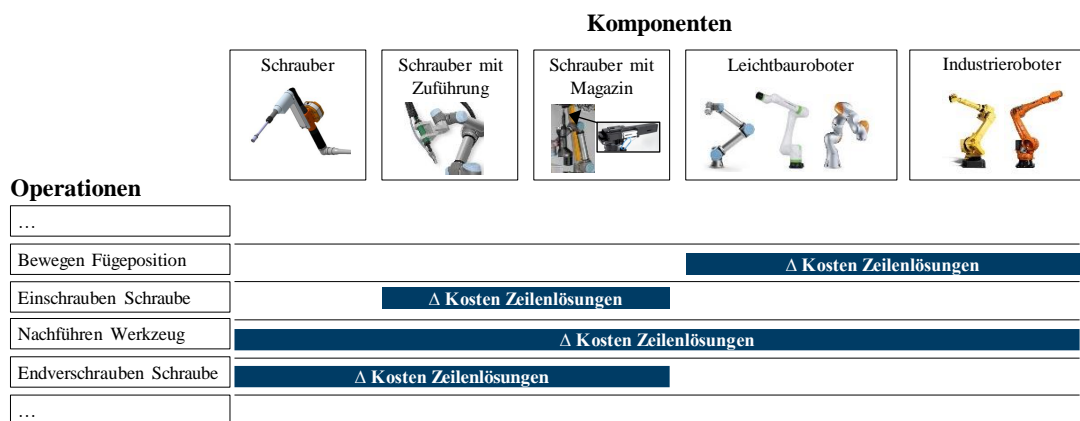


Abbildung 51: Morphologischer Kasten zur Zuordnung von PPR (exemplarisch)

### Verbesserungsverfahren

Die resultierende Basislösung aus dem Eröffnungsverfahren stellt aufgrund der Bedingungen und der Kompatibilität der Komponenten keine Garantie eines globalen Optimums dar. Daher ist über ein Verbesserungsverfahren diese Basislösung weiter zu optimieren (siehe (Domschke et al. 2015)). Bei der Zuordnung von PPR handelt es sich aufgrund der Bündelung von Teilprozessen nach Kapitel 8.2.3 um ein iteratives Vorgehen, bei der die Auswirkungen aus der Erhöhung der Flexibilitätsanforderung auf das Kosten-Nutzen-Verhältnis analysiert werden sollen. Damit die verschiedenen Anlagenkonzepte verglichen und damit die Auswirkungen ermittelt werden können, ist es erforderlich, dass bei gleichbleibenden Anforderungen gleiche Anlagenkonzepte konfiguriert werden. Somit ist ein deterministisches Verfahren zu favorisieren.

Im Rahmen des Verbesserungsverfahrens soll die Basislösung schrittweise verbessert werden. Hierfür wird das Prinzip des Eröffnungsverfahrens weiter verfolgt. Zunächst sind für jede Zeile des morphologischen Kastens die Differenzen zwischen der ausgewählten Zeilenlösung und der bzgl. der Kosten optimalsten Zeilenlösung zu bilden. Die Zeile mit dem größtmöglichen Potential kann dadurch identifiziert werden, analog der Best fit-Strategie nach (Domschke et al. 2015). Um folgend die Basislösung Schrittweise zu optimieren, ist die Zeile mit dem größtmöglichen Potential unabhängig der Bedingungen und der Kompatibilität nach dem Prinzip der Mutation (siehe (Domschke et al. 2015)) auszuwählen. Im Anschluss liegt eine verbesserte Lösung vor, bei der jedoch ggf. die einzelnen Komponenten der Zeilen zueinander nicht kompatibel sind. Aus diesem Grund sind anschließend für nicht kompatible Komponenten neue kompatible Komponenten auszuwählen. Die Reihenfolge der Auswahl der Zeilen ist analog des Eröffnungsverfahrens zu wählen. Es besteht folgend jedoch keine Sicherheit, dass die resultierende Lösung eine Verbesserung der Basislösung darstellt. Aus diesem Grund ist die neue Lösung als Ausgangspunkt für weitere Verbesserungen zu verwenden. Um dabei jedoch möglichst keine doppelten Lösungen zu generieren, sollen alle bereits generierten Lösungen gespeichert und eine wiederholte Auswahl verboten werden. Zusammengefasst baut das Verbesserungsverfahren auf dem Eröffnungsverfahren auf und kombiniert dieses mit dem genetischen Algorithmus der Mutation von einzelnen Zeilen sowie der Speicherung und dem Verbot von bereits durchgeführten Lösungen nach dem Tabu Search Verfahren (siehe (Domschke et al. 2015)). Andere genetische Algorithmen wie z. B. die Kreuzung von Lösungen eignet sich nicht direkt für die Problemstellung der Zuordnung. Hierdurch könnten zum einen in mehreren Zeilen Bedingungen und Kompatibilität verletzt werden. Zum anderen könnten die ausgewählten Lösungen der Population ebenfalls bereits miteinander inkompatibel sein.

Das beschriebene generische Verfahren ist noch einmal im Anhang 7 in Abbildung 78 im Detail dargestellt. Es eignet sich vor allem für die Zuordnung im Kontext der Wiederverwendung, da bei wiederholter Anwendung stets die gleichen Lösungen ausgewählt werden. Hierdurch können die Auswirkungen der Bündelung im Detail bestimmt werden (siehe Kapitel 8.2.3). Zudem werden verschiedene Reihenfolgen für die Auswahl von Zeilenlösungen betrachtet, wodurch unterschiedliche Optimierungen untersucht werden können. Eine kritische Betrachtung des Vorgehens zeigt jedoch:

- Die erste bzw. verbesserte Zeile stellt stets ein Extrema dar. So enthält jede Lösung häufig die beste Komponente einer Zeile. Jedoch muss nicht jede gute Lösung ein Extrema einer Zeile besitzen. Abhängig der Bedingungen sowie der Kompatibilität könnten ggf. durchschnittliche Zeilenlösungen zu besseren Gesamtlösungen führen.
- Das Verfahren ist stark von der Anzahl der Verbesserungsschritte abhängig. Durch das deterministische Vorgehen sowie der Identifikation der Differenzen werden ggf.

bei der Festlegung einer Anzahl von Verbesserungsschritten stets die gleichen Zeilen verbessert.

Innerhalb der Validierung dieser Arbeit ist daher folgend die Anzahl an sinnvollen Verbesserungsschritten herauszustellen. Außerdem ist zu untersuchen, ob bei der Mutation immer die beste Zeilenlösung auszuwählen ist oder ggf. zusätzliche Verbesserungsschritte mit der zweit- oder drittbesten Zeilenlösung zu besseren Ergebnissen führen.

### **Optimierung der Prozesszeit**

Für die Optimierung der Prozesszeit ist diese zunächst zu ermitteln. Die Prozesszeitanteile für die einzelnen Operationen aus Kapitel 8.1.2 können jedoch zwischen den verschiedenen Anlagenkonzepten stark variieren. Einfluss hierauf besitzen vor allem die folgenden Punkte:

- **Synchronisierungsprozess:** Findet die Synchronisierung mit dem Montagehauptkörper einmalig oder mehrmals statt.
- **Roboter Basis:** Steht der Roboter stationär oder bewegt sich der Roboter mit seiner Basis relativ zum Montagehauptkörper (siehe Kapitel 2.3).
- **Förderprinzip:** Bewegt sich der Montagehauptkörper während der Montage kontinuierlich in Förderrichtung (Fließbetrieb) oder hält temporär für die Montageprozesse an (Taktbetrieb).
- **Operationen:** Abhängig der erforderlichen Operationen, z. B. zusätzlicher Operationen für die Kontrolle der Lochdeckung (siehe Kapitel 8.1.2), stellen sich unterschiedliche Prozesszeiten für die Automatisierung des Prozesses ein.
- **Prozessreihenfolge:** Abhängig der Prozessreihenfolge können erhöhte Prozesszeiten für größere Wege zwischen den Fügepositionen notwendig sein.

Die Art des Synchronisierungsprozesses, der Roboter Basis, des Förderprinzips sowie der erforderlichen Operationen sind im Rahmen der Modellierung zu berücksichtigen. Die Prozessreihenfolge ist hingegen abhängig der gebündelten Teilprozesse und damit innerhalb der Konfiguration des Anlagenkonzepts zu optimieren. Im Wesentlichen wird von der Prozessreihenfolge die Operation des Bewegens zur Fügeposition beeinflusst. Die Prozesszeiten für die übrigen Operationen sind i. d. R. unabhängig dieser und sollen daher auf Basis von Erfahrungen und Versuchen fest definiert werden.

Zur Optimierung der Prozesszeit für die Operation des Bewegens zur Fügeposition ist der Fokus auf die Wege zwischen den Fügepositionen zu legen. Im Falle eines Fließbetriebs besitzen jedoch die oben genannten Punkte wiederum einen Einfluss auf die Wege. Mit Blick auf die verschiedenen Anlagenkonzepte aus Kapitel 2.3 sind die Wege vor allem abhängig des Synchronisierungsprozesses und der Roboter Basis. Ausgehend dieser Kombination ergeben sich die zwei unterschiedlichen Fälle.

- Fall A:** Der Roboter bewegt sich mit seiner Roboterbasis z. B. auf einer Lineareinheit, einem Manipulator oder einer mobilen Plattform synchron zum Fahrzeug (siehe Kapitel 2.3). Die Position des Roboters relativ zum Fahrzeug bleibt konstant. Zur Optimierung der Prozesszeit sind die Wege zwischen den Fügepositionen in X-, Y- und Z-Richtung zu optimieren.
- Fall B:** Der Roboter ist stationär befestigt und bewegt sich ausschließlich mit seinem Roboterarm synchron zum Fahrzeug. Die Position des Roboters zum Fahrzeug variiert abhängig der Geschwindigkeit der Fördertechnik. Die verfügbare Prozesszeit ist daher als Eingriffszeit zu verstehen, in der der Roboter die Reichweite besitzt die Fügeposition zu erreichen. Um möglichst viele Schraubprozesse durchführen zu können, ist vor allem mit weit entfernten Schraubprozessen zu starten. Die Wege sind hierbei primär in Förderrichtung (X-Richtung) zu optimieren.

Die Optimierung der Prozessreihenfolge stellt allgemein ein Reihenfolgeproblem dar bzw. kann mit dem Traveling Salesman-Problem (siehe (Domschke et al. 2015)) gleichgestellt werden. Aufgrund der vielfältigen Lösungsmöglichkeiten ist auch dieses Problem über eine Heuristik zu lösen. Zudem ist wie auch bei der Optimierung der Zuordnung, dieses Problem über ein deterministisches Vorgehen zu lösen, sodass bei wiederholter Anwendung jeweils das gleiche Ergebnis ermittelt wird (siehe Kapitel 8.2.3). Da es sich um eine Grobplanung handelt, besteht wie auch bei der Optimierung der Konfiguration des Anlagenkonzepts nicht der Anspruch in der Suche des Besten, sondern eines geeigneten Optimierungsverfahrens. Zur weiteren Vereinfachung wird zudem die Bewegung des Roboters als idealisiert betrachtet, in dem der direkte Weg zwischen den Koordinaten als Distanz verwendet wird. Für die Ermittlung der Prozesszeiten sind zudem die Fügepositionen um einen Offset von ca. 50 mm senkrecht zur Fügeposition zu verschieben. Grund hierfür ist, dass der Roboter häufig für eine höhere Prozesssicherheit kurz vor der Kontaktphase langsamer verfährt oder die Zustellbewegung durch den Schrauber erfolgt. Folgend werden Optimierungsverfahren für den Fall A und B vorgestellt, welche sich für den Anwendungsfall der Automatisierung von Schraubprozessen innerhalb der Automobilendmontage als geeignet herausgestellt haben.

### Optimierung Fall A

Für die Generierung einer Basislösung bieten sich innerhalb des Eröffnungsverfahrens der Nearest-Neighbor Algorithmus und das Verfahren der sukzessiven Einbeziehung an. Im Allgemeinen stellt das Verfahren der sukzessiven Einbeziehung bessere Lösungen dar, weshalb folgend dieses zur Generierung einer Basislösung verwendet werden soll. Um folgend die Basislösung weiter zu optimieren, ist ein Verbesserungsverfahren auszuwählen. Ein deterministisches Verbesserungsverfahren hierfür stellt ein 2-optimales bzw. k-optimales Verfahren dar (Domschke et al. 2015, Doerner et al. 2007), bei dem ein Austausch von Knoten

erfolgt. Da es sich bei den berechneten Bewegungs- und Prozesszeiten um grobe Annäherungen handelt und die Bewegungen des Roboters als idealisiert angenommen werden, ist ein einfaches 2-optimales Verfahren an dieser Stelle ausreichend.

### Optimierung Fall B

Für den Fall B, bei dem die relative Position zwischen Roboter und Fügeposition variable sein kann, ist das beschriebene Optimierungsverfahren nicht geeignet. Bei dem Eröffnungsverfahren der sukzessiven Erweiterung erfolgt keine hinreichende Betrachtung der sich verändernden relativen Fügepositionen. Ergebnis des Verfahrens könnten Lösungen sein, bei denen der Roboter zunächst eine Prozessreihenfolge entgegen der Förderrichtung durchführt und ab der entferntesten Fügeposition anschließend weitere Prozesse zurück in Förderrichtung durchführen soll. Dies ist häufig jedoch nicht möglich, da die Fügepositionen auf der Rückfahrt in Förderrichtung mit hoher Wahrscheinlichkeit bereits außerhalb der Reichweite des Roboters liegen. Viel mehr geeignet wäre somit ein Verfahren, welches sukzessiv alle Fügepositionen entgegen der Förderrichtung anfährt, ohne anschließend noch einmal zurückfahren zu müssen. Hierfür bietet sich der Nearest-Neighbor Algorithmus an, mit dem jeweils die nächstgelegenen Fügepositionen in Förderrichtung bzw. X-Richtung anzufahren sind. Eine weitere Optimierung der resultierenden Prozessreihenfolge soll an dieser Stelle nicht stattfinden, da aufgrund der kontinuierlichen Bewegung der Fügepositionen in X-Richtung die Prozesszeit für ein zurückfahren des Roboters in Förderrichtung zu hoch wäre. Als maximal verfügbare Prozesszeit ist für diesen Fall nicht die Taktzeit sondern die maximal mögliche Eingriffszeit  $E_t$  des Roboters zu verwenden. Diese kann Näherungsweise über die Distanz zwischen der ersten und letzten Fügeposition in X-Richtung sowie der Reichweite des Roboters inklusive der Länge des Schraubwerkzeugs berechnet werden (siehe 6). Im Falle einer mehrmaligen Synchronisierung sind die zusätzlichen Prozesszeiten ebenfalls von der Eingriffszeit abzuziehen.

$$E_t = \frac{\text{Distanz Fügepositionen} + \text{Reichweite Roboter} + \text{Länge Werkzeug}}{\text{Geschwindigkeit Fördertechnik}} \quad (6)$$

Mit der resultierenden Prozessreihenfolge sind anschließend die Prozesszeiten für das Bewegen zur Fügeposition zu ermitteln. Dazu sind unter anderem abhängig des Fahrweges zwischen den Fügepositionen Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsverläufe zu berücksichtigen.

### **8.2.5 Detailkonzept zur Konfiguration von Anlagenkonzepten**

Die einzelnen Schritte der Ermittlung der Ähnlichkeiten, Bündelung sowie der Zuordnung und Optimierung von PPR sind für das folgende Detailkonzept der Konfiguration von Anlagenkonzepten in einen kausalen Zusammenhang zu bringen. Um ein Detailkonzept für die



Konfiguration von Anlagenkonzepten aufzustellen, ist zusätzlich die Anwendersicht einzu- beziehen. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt hierbei auf der systematischen Wiederverwen- dung von Modulen, um infolge der identifizierten Wiederverwendungen die Wiederver- wendbarkeit der betrachteten Module bewerten zu können. Dies stellt zugleich eine Ressour- cenorientierte Sicht dar. Neben dieser Sicht bestehen weitere Sichtweisen wie z. B. eine pro- dukt-/ prozessorientierte Sicht, bei dem für spezifische Produkte bzw. Prozesse ein geeigne- tes Anlagenkonzept zu konfigurieren ist. Ebenso ist eine Mischung der beiden Sichtweisen möglich, indem eine Vorauswahl bestimmter Module bzw. Ressourcen sowie Produkte und Prozesse vorgenommen wird.

Harmonisiert mit der Zielstellung (siehe Kapitel 1.2) und dem Gesamtkonzept (siehe Kapi- tel 6.1) der Arbeit sind in der Abbildung 52 die Sichtweisen in einem Zusammenhang dar- gestellt. Idealiert existieren für die betrachteten Ressourcen bereits Erfahrungen aus Erpro- bungen und der Nutzung dieser. Ebenso wurden bereits von Domain Experten die Fähigkei- ten der Ressourcen beschrieben und Regeln für die Konfiguration festgelegt (siehe Kapitel 8.2.4). Kurzfristig betrachtet ist die Konfiguration von Anlagenkonzepten ausgehend einer jeden Sichtweise möglich. Jedoch sollte für eine systematische Analyse der Wiederverwend- barkeit und Verbesserung des Engineerings mit einer ressourcenorientierter Sicht begonnen werden. In dieser sind so zunächst alle möglichen Wiederverwendungen von Ressourcen zu identifizieren, um so folgend im nächsten Schritt ganzheitlich die Wiederverwendbarkeit analysieren zu können. Mit einer zunehmenden Referenzmenge an analysierten Ressourcen ist anschließend eine qualitativ bessere Konfiguration von Anlagenkonzepten innerhalb der produkt-/ prozessorientierten Planung möglich. Denn in dieser kann folgend die Wiederver- wendbarkeit einzelner Ressourcen mit berücksichtigt werden.

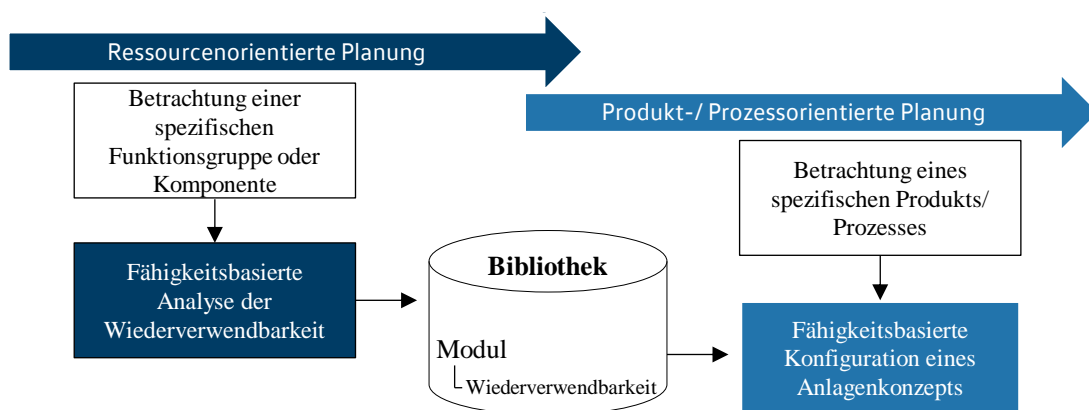


Abbildung 52: Idealisierter Prozess der Konfiguration von Anlagenkonzepten abhängig der Anwendersicht

In der Abbildung 53 ist das Detailkonzept der Konfiguration von Anlagenkonzepten, ein- schließlich der Vorauswahl der Anwendersicht, dargestellt. In dem ersten und zweiten Schritt kann eine Vorauswahl des Montagelinienabschnittes, von Ressourcen sowie von Pro- dukten und Prozessen vorgenommen werden. Hierbei kann die Konfiguration individuell entsprechend einer der Sichtweisen eingestellt werden. Anschließend sind entsprechend des

Kapitels 8.2.2 ähnliche Teilprozesse zu gruppieren, unter der Berücksichtigung der potentiellen Flexibilität der Ressourcen. Wurden vom Anwender Teilprozesse vorausgewählt bzw. aussortiert, gilt es dies während der Gruppierung zu berücksichtigen.

In den nächsten Schritten vier bis sieben wird die eigentliche Konfiguration von Anlagenkonzepten durchgeführt. Wie in Kapitel 8.2.1 herausgestellt, ist das Vorgehen separat für eine bestimmte Funktionsgruppe durchzuführen. Zu optimieren ist jeweils das Kosten-Nutzen-Verhältnis der Montagestation, indem verschiedene Kombinationen von Komponenten untersucht werden. Nach Kapitel 8.2.3 gilt es mehrere Prozesse zu bündeln, um den Nutzen der Montagestation zu erhöhen. Diese Bündelung erfolgt wie in Kapitel 8.2.3 beschrieben in Anlehnung an das agglomerative hierarchische Clusterverfahren, in dem in Schritt vier die Teilprozesse der Montagestation schrittweise um einen weiteren Teilprozess erweitert werden. Für jede mögliche Erweiterung sind im folgenden Schritt fünf Montagestationen auszuwählen bzw. zu optimieren. Der Optimierungsalgorithmus wird im Detail in Kapitel 8.2.4 beschrieben. Während der Auswahl von Komponenten, Funktionsgruppen und einer Montagestation ist stets zu prüfen, ob im Schritt zwei eine Vorauswahl von Ressourcen durch den Anwender stattgefunden hat. Nach der Optimierung der Montagestationen gilt es die Prozessreihenfolge der ausgewählten Teilprozesse zu optimieren, um dadurch die Prozesszeit zu verringern und ggf. weitere Teilprozesse der Montagestation hinzufügen zu können. Der hierfür anzuwendende Optimierungsalgorithmus ist in Kapitel 8.2.4 beschrieben. Ausgehend der erforderlichen Prozesszeit ist zudem zu überprüfen, ob weitere Iterationen und damit weitere Bündelungen von Teilprozessen in der Montagestation möglich sind oder ob das Abbruchkriterium, die Überschreitung der Taktzeit, erreicht wurde. Sollte letzteres der Fall sein, dann gilt es im jeweiligen Fall die in der vorherigen Iteration generierte Montagestation als finale Lösung heranzuziehen und das Vorgehen zu beenden. Hingegen sind Montagestationen die zu keiner Überschreitung der Taktzeit führen im Vorgehen weiter zu betrachten. Im letzten Schritt sieben der Iteration sind die Kosten-Nutzen-Verhältnisse eines jeden generierten Anlagenkonzepts zu vergleichen. Für das beste Anlagenkonzept bzw. der besten Bündelung von Teilprozessen ist folgend eine neue Iteration zu starten.

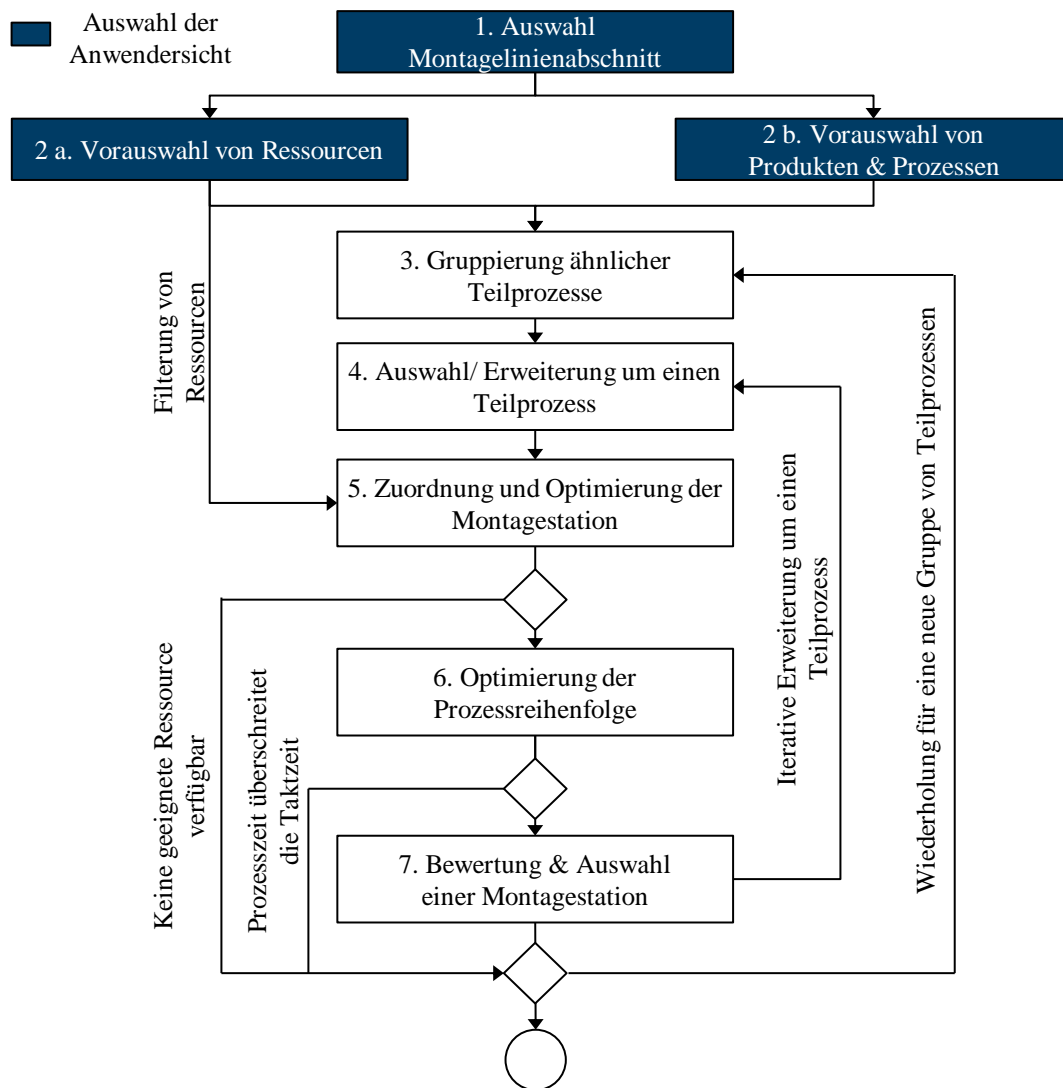


Abbildung 53: Detailkonzept der fähigkeitsbasierten Konfiguration von Anlagenkonzepten

Sollten bereits in frühen Iterationen Teilprozesse mit voneinander weit entfernten Fügepositionen ausgewählt werden, können zum Ende ggf. durch die hohen Verfahrswege weniger Teilprozesse in der Montagestation gebündelt werden. Um daher frühzeitig die Auswirkungen von hohen Verfahrswegen berücksichtigen zu können, soll im Kosten-Nutzen-Verhältnis der theoretische maximale Nutzen herangezogen werden. Zur Berechnung dessen ist ausgehend der aktuellen Anzahl von gebündelten Teilprozessen sowie der dafür benötigten Prozesszeit auf die theoretisch maximal mögliche Anzahl von Teilprozessen unter der Berücksichtigung der Taktzeit linear zu interpolieren.

### 8.3 Entwicklung eines Integrationskonzepts

Wie in Kapitel 6.1 beschrieben gilt es mit den generierten Anlagenkonzepten folgend ein Integrationskonzept zu entwickeln, um hierdurch die Auswirkungen der Anlagenkonzepte auf die Montagelinie bzw. den Montagelinienabschnitt zu analysieren und eine finale Auswahl treffen zu können. Das Ziel besteht nach Kapitel 6.1 und der Forschungsfrage 11 darin,

mehrere Montagestationen örtlich in der Montagelinie zu bündeln und durch eine Mehrfachverwendung von Modulen die Auslastung der Montagestationen zu erhöhen und Kosten einzusparen. Zentrale Forschungsfrage des Kapitels lautet:

11. „Wie kann eine Mehrfachverwendung von Modulen in der Automobilendmontage für mehrere Anlagenkonzepte analysiert werden?“

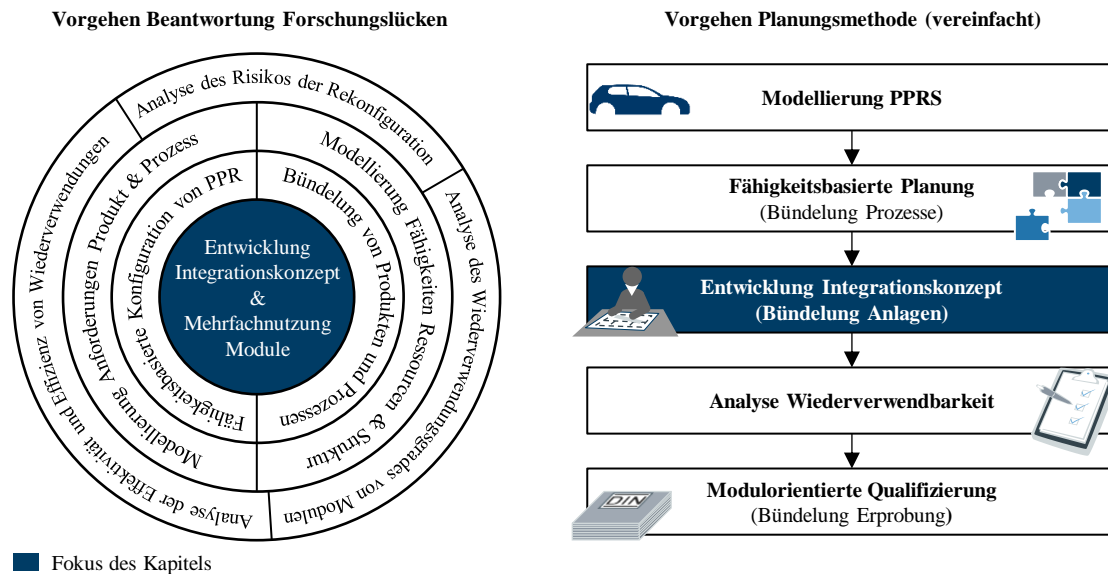


Abbildung 54: Einordnung des Kapitels 8.3 in den Forschungskontext und das Gesamtkonzept

Nach Kapitel 8.2.1 kann diese Forschungsfrage weiter konkretisiert werden. Im Detail gilt es mehrere Montagestationen zu einer Montageeinheit zusammenzufassen. Hierfür sollen zunächst die Restriktionen zur Bündelung von Montagestationen ermittelt werden. Anschließend soll basierend hierauf das Detailkonzept entwickelt werden, mit dem eine Bündelung der Montagestationen und Entwicklung eines Integrationskonzepts möglich ist.

### 8.3.1 Restriktionen zur Bündelung von Montagestationen

Nach Kapitel 7.4 ist innerhalb der Entwicklung des Integrationskonzepts der Nutzen über die eingesparten Mitarbeiter im Montagelinienabschnitt zu ermitteln. Häufig automatisieren einzelne Montagestationen jedoch nur einen Teil der Prozessumfänge eines Mitarbeiters. Daher gilt es im Rahmen der Bündelung von Montagestationen zu untersuchen, welche Montagestationen zu einem optimalen Verhältnis von Kosten und Nutzen für den Montagelinienabschnitt führen. Ziele der Bündelung von Montagestationen sind somit die:

- Erhöhung des Nutzens von Montagestationen in dem Montagelinienabschnitt zur vollständigen Automatisierung der Prozessumfänge eines Mitarbeiters.
- Reduzierung des Flächenbedarfs und damit ggf. auch Kosten des Montagelinienabschnittes für Automatisierungen.
- Reduzierung der Kosten durch die Mehrfachverwendung von Modulen.

Wie in Kapitel 8.1.4 exemplarisch dargestellt besteht eine Montagestation für Schraubprozesse z. B. aus einer Funktionsgruppe für das Ein- und Endverschrauben, einer Funktionsgruppe für die Bereitstellung sowie Funktionsgruppen für die Anlagensteuerung und Schutztechnik. Mit der Bündelung von mehreren Prozessen in einer Funktionsgruppe für das Ein- und Endverschrauben, der prozessausführenden Funktionsgruppe, ist die Auslastung dieser Funktionsgruppe bereits erschöpft und eine weitere Mehrfachverwendung dieser Funktionsgruppe nicht möglich (siehe Kapitel 8.2.3). Hingegen können die Funktionsgruppen für die Bereitstellung oder für die Schutztechnik für örtlich gebündelte Montagestationen mehrfach verwendet werden, sofern diese entsprechende Fähigkeiten besitzen. Im Falle von Sensoren ist abhängig des Anwendungsfalls eine Mehrfachverwendung der Daten und Informationen der Sensoren zu überprüfen. Sensoren die z. B. Informationen über die aktuelle Fahrzeugposition besitzen, können diese Informationen an mehrere Montagestationen innerhalb des gleichen Taktes weitergeben. Die Funktionsgruppe der Anlagensteuerung kann zudem auch für Montagestationen mehrfach verwendet werden, die nicht im gleichen Takt oder direkt im nächsten Takt positioniert sind. Somit müssen in einer Montageeinheit die Montagestationen nicht zwingend direkt nebeneinander positioniert sein, sondern können auch in einem Abstand von mehreren manuellen Zwischentakten positioniert werden. Generell gilt es somit das Potential der Bündelung für jede Montagestation zu untersuchen. Das Potential der Bündelung ist mit neuen Anlagenkonzepten weiter zu überprüfen. Neue Anlagenkonzepte bzw. Technologien könnten z. B. ebenfalls neue Potentiale für eine mögliche Bündelung beinhalten.

Neben der Analyse der Montagestationen selbst sind wie in der Abbildung 55 dargestellt die Prozesse und die Struktur zu analysieren. Um Montagestationen zu bündeln sind, wie auch bei der Bündelung von Prozessen in Kapitel 8.2.3, Abhängigkeiten und Restriktionen zwischen den Prozessen zu analysieren. Ebenso ist zu prüfen, ob eine Integration der Montagestation/ Montageeinheit in die Struktur technisch möglich ist. Folgend sollen daher die Restriktionen ausgehend der Prozesse sowie der Struktur analysiert werden.

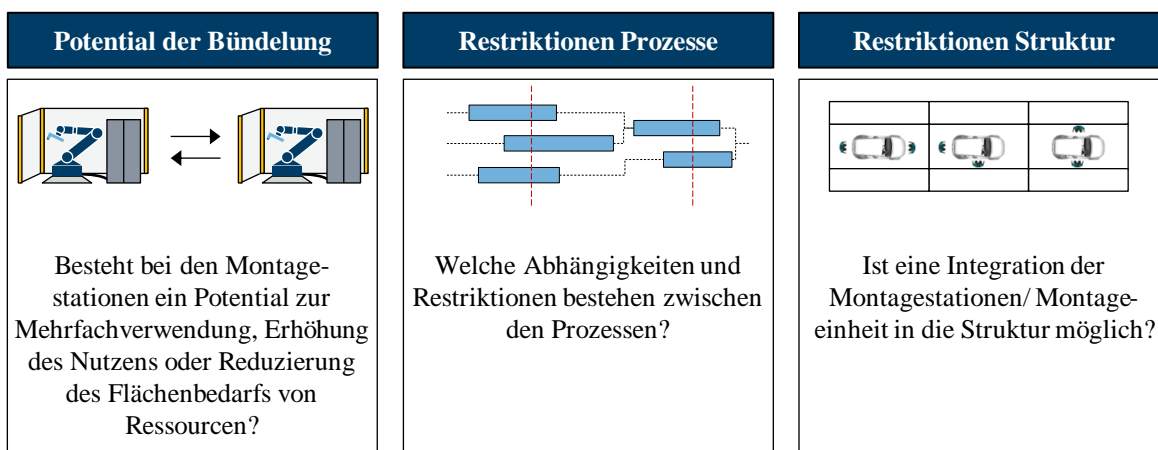


Abbildung 55: Fragestellungen hinsichtlich der Bündelung von Montagestationen

### Potential der Bündelung

Wie bereits beschrieben kann bei der Bündelung von Montagestationen nach zwei verschiedenen Fällen unterschieden werden. Die Bündelung im gleichen oder angrenzenden Takt, folgend als direkte Bündelung bezeichnet, und der Bündelung mit mehreren Zwischentakten, folgend als indirekte Bündelung bezeichnet. Das Potential der Mehrfachverwendung (siehe Kapitel 3.3) der Bereitstellung, Schutztechnik, Sensoren oder der Anlagensteuerung (siehe Kapitel 2.3, Abbildung 5) ist dabei von den folgenden Punkten abhängig:

- Bereitstellung:** Die Funktionsgruppe der Bereitstellung oder eine der Komponenten der Funktionsgruppe muss geeignete Fähigkeiten für die gebündelten Montagestationen besitzen. Des Weiteren muss die Zugänglichkeit zu der Funktionsgruppe bzw. der Komponente, falls erforderlich, für die gebündelten Montagestationen gegeben sein.
- Schutztechnik:** Die Funktionsgruppe der Schutztechnik muss alle Gefahren und Risiken der gebündelten Montagestationen bzw. der Montageeinheit berücksichtigen.
- Sensoren:** Die Mehrfachverwendung von Sensoren ist vor allem von der Art der Daten und Informationen sowie der Vernetzung der Montagestationen miteinander abhängig.
- Anlagensteuerung:** Die Versorgungs- und Signalleitungen der Anlagensteuerung müssen eine ausreichende Reichweite besitzen, um die gebündelten Montagestationen zu versorgen und zu steuern. Zudem muss die Anlagensteuerung eine ausreichende Kapazität besitzen, um die Anzahl an Montagestationen versorgen zu können.

Allgemein stellen die aufgezählten Punkte keine Restriktionen dar, sondern sind einzig zur Bestimmung des Potentials einer Mehrfachverwendung zu untersuchen. Neben dem Potential treten jedoch auch Restriktionen auf. Sollte z. B. eine Montagestation die Interaktion von Mitarbeitern erfordern und ist für den MRK-Betrieb ausgelegt, ist es notwendig, dass bei einer direkten Bündelung eine nicht MRK fähige Montagestation ausreichend für den Mitarbeiter mit Hilfe einer Schutztechnik abgesichert wird. Die manuellen Tätigkeiten des Mitarbeiters müssen dabei weiterhin möglich sein.

Insbesondere bei der direkten Bündelung von Montagestationen ist, für den Anwendungsfall der starren Verkettung der Fahrzeuge innerhalb der Montagelinie (siehe Kapitel 2.2), zudem auf die Lösung der Notstrategie zu achten. Im Falle einer Störung sollte es schnell und einfach möglich sein, den Prozess mit Hilfe der Notstrategie ausführen zu können. Die Notstrategie kann abhängig des Prozesses z. B. ein manuell geführtes Werkzeug, ein Manipulator oder eine redundante Montagestation im gleichen oder einem der nächsten Takte sein.

Grundsätzlich sollten jedoch die Auswirkungen auf die Verfügbarkeit der Montage untersucht werden, insbesondere wenn:

- die Notstrategie des auszuführenden Prozesses umgehend im gleichen Takt erfolgen muss oder
- die Prozesse der gebündelten Montagestationen voneinander abhängig sind und die Störung einer vorgelagerten Montagestation die Ausführung der Prozesse der übrigen Montagestationen verhindert.

Auch wenn keine Mehrfachverwendung von Ressourcen möglich ist, kann eine direkte Bündelung von Montagestationen sinnvoll sein. Wie bereits beschrieben kann so ggf. der Flächenbedarf und damit auch die Kosten für den Montagelinienabschnitt oder auch der Nutzen von Automatisierungen optimiert werden. Um zu untersuchen ob die Bündelung zu einem höheren Nutzen oder geringeren Flächenbedarf führt, ist jeweils eine grobe Prozessplanung des Montagelinienabschnittes erforderlich.

### **Restriktionen Prozesse**

Um eine direkte Bündelung von Montagestationen in einem Takt durchführen zu können, ist die Fugerangfolge zu untersuchen. Eine direkte Bündelung kann nicht stattfinden, wenn die Prozesse aufgrund ihrer Vorgänger-/ Nachfolger Abhängigkeit nicht parallel oder direkt nacheinander erfolgen können. Außerdem ist zu kontrollieren, ob Prozesse eine zeitliche oder technische Abhängigkeit zueinander besitzen. Als Beispiel sind hier Reinigungs- und Klebprozesse zu erwähnen.

Allgemein ist es häufig sinnvoll symmetrische Prozesse der unterschiedlichen Fahrzeugseiten in einem Takt parallel durchzuführen. Variantenabhängige Umfänge können z. B. bei Rechts- und Linkslenker Fahrzeugen entsprechend aufgeteilt und die Materialanstellung vereinheitlicht werden.

### **Restriktionen Struktur**

Zur Integration von Montagestationen in der Struktur bzw. dem Takt ist zunächst zu untersuchen, ob die Montagestationen für das jeweilige Fließprinzip, der Fördertechnik und der Taktzeit geeignet sind. Die erforderliche Prozesszeit einer Montagestation darf die Taktzeit nicht überschreiten. Ebenso ist zu prüfen, ob Prozesse aufgrund struktureller Eigenschaften bereits eine feste Position im Montagelinienabschnitt besitzen. Dies ist z. B. bei Prozessen der Fall, welche ihre Bauteile über Heber oder ähnliche feste Strukturen innerhalb der Montagelinie bereitgestellt bekommen.

In (Weidemann 2017) sind zur Clusterung von Prozessen Eigenschaften wie z. B. die Einbauhöhe oder der Bauraum beschrieben. Diese gilt es bei der Integration und Bündelung von Montagestationen in der Struktur ebenfalls zu berücksichtigen. Zwischen den einzelnen Tak-

ten unterscheiden sich die Einbauhöhen, um die Erreichbarkeit zu dem jeweiligen Fahrzeugbereich zu gewährleisten. Bei einer direkten Bündelung in einem Takt müssen die Prozesse daher jeweils bei der gleichen Einbauhöhe möglich sein. Ebenso ist der Bauraum bzw. der Flächenbedarf der Montagestation zu prüfen. Die erforderlichen Taktflächen dürfen nicht in Kollision geraten. Da der Fokus auf Brownfield-Fabriken liegt, ist ebenso zu prüfen, ob im Takt selbst die entsprechenden Flächen verfügbar sind. Benötigt z. B. eine Montagestation mit einer Synchronisierung bei der der Roboter relativ zum Fahrzeug bewegt wird den vollständigen Takt, kann mit hoher Wahrscheinlichkeit keine zusätzliche Montagestation mit einem stationären Roboter im selben Bereich positioniert werden.

Bei der Überprüfung des Flächenbedarfs ist der Fokus nicht nur auf die Montagestationen zu legen, sondern es sind die manuellen Prozesse mit einzubeziehen. Außerdem ist zu untersuchen ob eine ausreichende Fläche für die Materialanstellung zur Verfügung steht.

### **8.3.2 Detailkonzept zur Entwicklung eines Integrationskonzepts**

Wie im Grobkonzept in Kapitel 6.1 dargestellt ist nach der fähigkeitsbasierten Konfiguration von Anlagenkonzepten ein Integrationskonzept zu entwickeln, um dadurch Montagestationen final auswählen zu können. Das Vorgehen knüpft daher direkt am Schritt sieben der Konfiguration von Anlagenkonzepten aus Kapitel 8.2.5 an. Im vorherigen Kapitel sind insbesondere für die direkte und auch indirekte Bündelung mehrerer Montagestationen zu Montageeinheiten Restriktionen aufgeführt. Diese gilt es im folgenden Detailkonzept zur Entwicklung eines Integrationskonzepts zu berücksichtigen.

Mit Hilfe der Restriktionen konnte das Vorgehen aus der Abbildung 57 abgeleitet werden. Zunächst sind im Schritt acht, abhängig des betrachteten Montagelinienabschnittes, nicht mit dem Fließprinzip, der Fördertechnik oder auch der Taktzeit kompatible Montagestationen auszusortieren. Ebenso können abhängig der Kriterien aus Kapitel 7.1 Montagestationen ausgeschlossen werden, sofern diese bereits für die Montagestationen vorliegen. Die weiteren Schritte des Detailkonzepts werden folgend beschrieben.

#### **Grobe Positionierung der Montagestationen abhängig der Prozesse im Layout**

Im Schritt neun erfolgt eine erste Grobpositionierung der Montagestationen abhängig der Restriktionen Fügerangfolge, technische und zeitliche Abhängigkeit sowie der Einbauhöhe (siehe Abbildung 56). Montagestationen die im gleichen Takt positioniert werden können, sind hinsichtlich ihres Potentials einer direkten Bündelung zu untersuchen. Können Montagestationen in der Nähe voneinander positioniert werden, stellt sich zusätzlich ein Potential für eine indirekte Bündelung heraus.



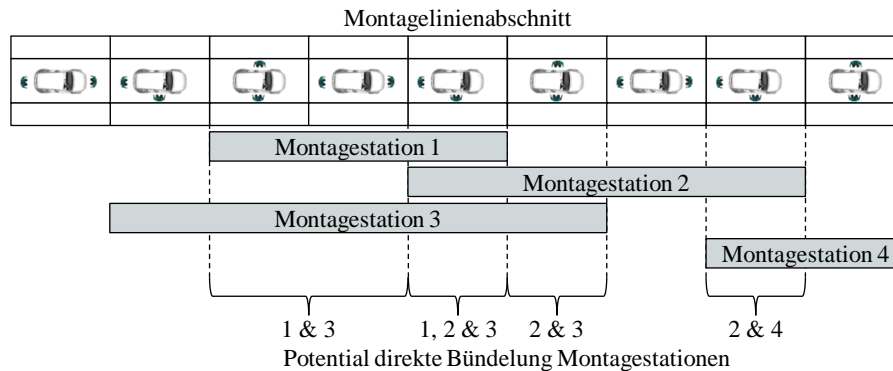


Abbildung 56: Exemplarische Positionierung der Montagestationen im Montagelinienabschnitt

### Prüfung des Potentials der Montagestationen zur direkten und indirekten Bündelung

Ausgehend der groben Positionierung aus Schritt neun können im Schritt elf die möglichen Bündelungen hinsichtlich ihrer Potentiale untersucht werden. Dazu ist zum einen das Potential der Mehrfachnutzung von Ressourcen für die Bereitstellung, der Schutztechnik und der Anlagensteuerung zu untersuchen. Zum anderen kann bereits kontrolliert werden, ob eine direkte Bündelung der Montagestationen ausgehend der Restriktion der verfügbaren Taktfläche möglich wäre. Sofern durch die Bündelung der Montagestationen Kosten eingespart werden können, ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis der jeweilig betroffenen Montagestation anzupassen.

### Auswahl von Montagestationen und Grobtaktung des Montagelinienabschnittes

Im Schritt elf sind anschließend Montagestationen auszuwählen und über eine Grobtaktung im Montagelinienabschnitt zu integrieren. Hierbei sind ganzheitlich alle Restriktionen zu berücksichtigen. Die Auswahl kann zudem als Optimierungsproblem betrachtet werden, bei dem wie auch in Kapitel 8.2.4 zunächst eine Basislösung zu entwickeln und anschließend zu verbessern ist. Im Rahmen dieser Arbeit wird die eigentliche Taktung bzw. Prozessplanung jedoch nicht weiter beschrieben (siehe Kapitel 5.1). Mögliche Ansätze für eine Grobtaktung bezogen auf diese Arbeit wären:

- Auswahl der Montagestationen abhängig der Kriterien aus Kapitel 7.1
- Auswahl der Montagestationen unter Berücksichtigung der Wiederverwendung gleicher Montagestationen, Funktionsgruppen und Komponenten

Für Montagestationen die mit Hilfe des Vorgehens aus Kapitel 8.2 generiert wurden, liegen nicht zwangsläufig detaillierte Daten hinsichtlich der Kriterien zur Bewertung der Wiederverwendbarkeit vor. Daher soll das Kosten-Nutzen-Verhältnis verwendet werden. Dieses Verhältnis ist jedoch stets relativ zu der jeweiligen Montagelinie zu betrachten. Denn die Einstufung des Verhältnisses ist stark abhängig von der Montagelinie und des Standorts und hängt damit von der zu produzierenden Stückzahl an Fahrzeugen ab. Aus diesem Grund ist es zielführend, zunächst Montagestationen mit einem relativ hohen Kosten-Nutzen-Verhält-

nis auszuschließen. Mit Hilfe der übrigen Montagestationen wird folgend der Ansatz vorgeschlagen, in dem ersten Integrationskonzept jeden Prozess zu automatisieren, für den ein Anlagenkonzept zur Verfügung steht. Nach der Grobtaktung und Bewertung im Schritt zwölf können hierdurch die Auswirkungen einer jeden Automatisierung untersucht werden, woraufhin vom Planer Verbesserungen wie z. B. der Austausch oder das Entfernen von Montagestationen durchgeführt werden können.

Voraussetzung für eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Grobtaktungen ist, dass für die Abtaktung (dem assembly line balancing) gleiche Konzepte verwendet werden. Mögliche Abtaktungsmethoden sind z. B. die Austaktung nach der größten Einheit (Maximal Takt), die Taktung unter Einsatz von Springern für Überlast (Springer) oder die mittlere Austaktung mit Übertaktung (WATT aus dem engl. für weighted average tact time) (siehe (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, Mönch, Huchzermeier und Bebersdorf 2022)).

### Bewertung des Integrationskonzepts

Die Bewertungen des Integrationskonzepts sollen wie bereits in Kapitel 7.4 beschrieben nach dem Kosten-Nutzen-Verhältnis erfolgen. Als Nutzen sind die eingesparten Mitarbeiter zu betrachten. Innerhalb der Kosten sind zudem die Effekte aus der Mehrfachnutzung als auch Kosten für z. B. zusätzliche Taktflächen einzubeziehen. Im Einzelnen sind zudem die Montagestationen zu identifizieren, die sich bezogen auf den Montagelinienabschnitt negativ auf das Kosten-Nutzen-Verhältnis ausprägen. Diese gilt es in Verbesserungsschritten auszutauschen oder zu entfernen. Verbesserungen sind solange durchzuführen, bis entweder keine Montagestation einen negativen Einfluss auf die Montage ausübt bzw. keine Ausreißer vorhanden sind oder das Integrationskonzept von Planern im Vergleich zu anderen Integrationskonzepten als gut genug bewertet wird.

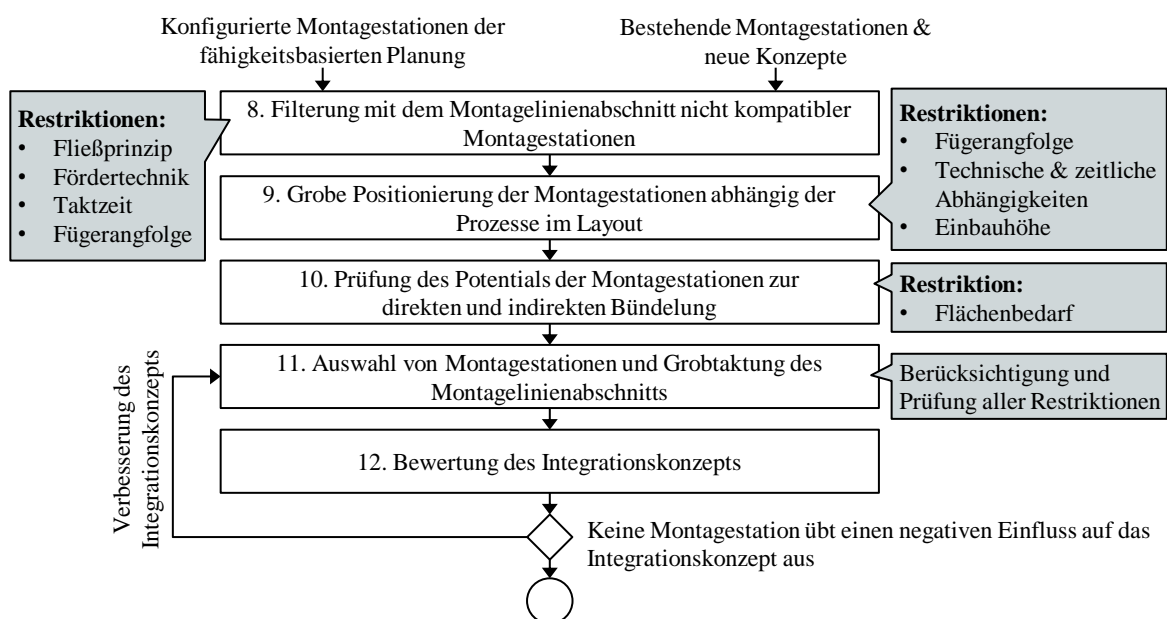


Abbildung 57: Detailkonzept zur Entwicklung eines Integrationskonzepts

## 9 Methodenanwendung in der Automobilendmontage

In diesem Kapitel soll eine Beispielanwendung der im vorherigen Kapitel beschriebenen Methode stattfinden. Ziel ist es, die im Vorfeld in Kapitel 5 zusammengefassten Anforderungen sowie die Funktionen und Eigenschaften der einzelnen Schritte der Methode abzusichern. Nach der (VDI 2206) beinhaltet eine Eigenschaftsabsicherung sowohl eine Verifikation als auch Validierung, welche innerhalb der Methodenanwendung berücksichtigt werden sollen. Die Anwendung der Methode soll an einem Fallbeispiel durchgeführt werden, für das analog der Schritte aus Kapitel 6.1 die Wiederverwendbarkeit zu analysieren ist. Dazu erfolgt zunächst eine Modellierung des Fallbeispiels und anschließend eine fähigkeitsbasierte Konfiguration von Anlagenkonzepten sowie die Entwicklung eines Integrationskonzepts. Auf Basis der identifizierten effektiven Wiederverwendungen wird anschließend die Wiederverwendbarkeit der Anlagenkonzepte analysiert.

Im Gesamtkonzept aus Kapitel 6.1 ist folgend der Analyse der Wiederverwendbarkeit eine modulatorientierte Qualifizierung der Anlagenkonzepte durchzuführen. Für die konfigurierten Anlagenkonzepte soll ein möglicher Ausblick für eine derartige Qualifizierung vorgestellt werden. Ausgehend der Anwendung und der Ergebnisse der Methode erfolgt abschließend eine Diskussion der Ergebnisse inklusive einer Methodenkritik sowie eine Darstellung offener Handlungsfelder.

### 9.1 Modellierung des Fallbeispiels

Damit eine Anwendung der Methode stattfinden kann, sollen im ersten Schritt analog des Kapitels 8.1 die erforderlichen Daten, Informationen und Wissen von Produkt, Prozess und Ressource beschrieben werden. Außerdem werden die Schritte eins und zwei der fähigkeitsbasierten Planung aus Kapitel 8.2.5 gleich mit berücksichtigt. Im Fallbeispiel wird im Detail der Fokus auf die Schraubprozesse der Montagelinienabschnitte eins und zwei der Automobilendmontage für das Fahrzeug ID.4 gelegt (siehe Kapitel 2.2). Diese Abschnitte besitzen ähnliche strukturelle Eigenschaften wie z. B. die gleiche Fördertechnik, bei der das Fahrzeug auf einem Skid im Fließbetrieb transportiert wird. Des Weiteren befinden sich innerhalb dieser Montagelinienabschnitte, welche sich vor dem Fahrwerkeinbau befinden, eine Vielzahl von Schraubprozessen. Die Abschnitte stellen somit ein hohes Potential für die Wiederverwendung gleicher Anlagenkonzepte dar und sollen im Folgenden für die erste Anwendung der Methode berücksichtigt werden. Ebenso wird für eine erste Anwendung der fähigkeitsbasierten Planung eine ressourcenorientierte Planung (siehe Kapitel 8.2.5) forciert. Für die Planung wird im Fallbeispiel eine Funktionsgruppe gewählt, für die bereits erste Erfahrungen aus der Nutzung sowie der Erprobung zugänglich sind. Hierdurch können bereits Regeln für die Konfiguration abgeleitet werden.

### 9.1.1 Funktionsgruppe „Montageassistent“

Die ressourcenorientierte Planung innerhalb dieser Arbeit erfolgt ausgehend der Funktionsgruppe „Montageassistent“, welche sich besonders für eine Automatisierung von Schraubprozessen innerhalb manueller Montagelinien eignet. In der Abbildung 58 ist diese exemplarisch für Schraubprozesse zum Endverschrauben im vorderen Innenraum dargestellt. Die Funktionsgruppe des Montageassistenten selbst besteht aus einem Manipulator und Verfahrwagen, welche an einem Schienensystem des Montagelinienabschnittes anzubinden und zu führen sind. Am unteren Ende des Manipulators befinden sich mechanische Absteckungen für die Befestigung des Manipulators am vorderen und hinteren Türscharnier. Die Grobpositionierung und Absteckung des Manipulators erfolgt hierbei manuell von einem Mitarbeiter, welcher den Manipulator über ein Bedienpanel steuern kann. Anschließend wird durch das Mitziehen des Manipulators von der Karosserie eine mechanische Synchronisierung realisiert (siehe Kapitel 2.3.1), ähnlich des Konzepts nach (ZeMA 2018, Scholer 2018). Für die Ausübung des Schraubprozesses ist am Manipulator ein Roboter mit einem Schrauber befestigt. Dieser bewegt sich nach der Absteckung in den Fahrzeuginnenraum für das Endverschrauben der Schrauben bzw. Muttern. Zum Ende der Schraubprozesse bewegt sich der Roboter zurück in seine Startposition. Der Manipulator löst automatisch die Absteckung und fährt kraft geregelt mit Hilfe einer Rückführung zum Anfang des Montagetaktes in seine Ausgangsposition zurück.

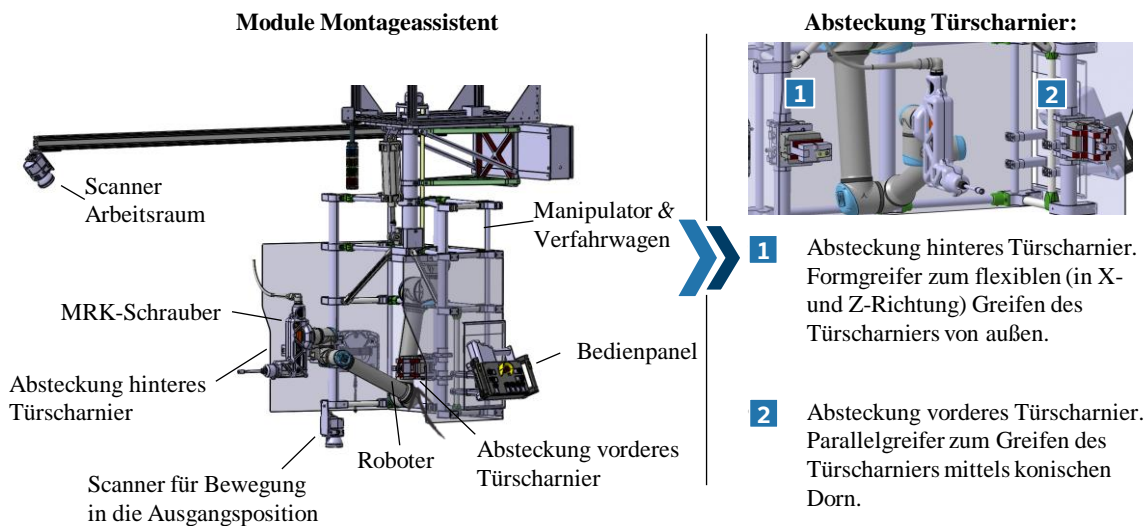


Abbildung 58: Funktionsgruppe „Montageassistent“

Für die Arbeitssicherheit sind mehrere Maßnahmen vorhanden. Für die unmittelbare Sicherheit des Mitarbeiters gegenüber dem Roboter ist dieser am Manipulator mit einer Sicherheitsscheibe umgeben. Zum Schutz weiterer Mitarbeiter, die parallel Tätigkeiten im Arbeitsbereich durchführen, ist auf der gegenüberliegenden Fahrzeugseite ein Scanner vorgesehen. Außerdem ist ein weiterer Scanner am Manipulator installiert, welcher beim automatischen Zurückfahren des Manipulators die Sicherheit der Mitarbeiter gewährleisten soll.

Neben der Überwachung der Arbeitsbereiche ist es zudem möglich einen MRK fähigen Schrauber zu verwenden.

### Operationen und Komponenten des Montageassistenten

Die Architektur der Funktionsgruppe des Montageassistenten ist in der Abbildung 59 noch einmal mit den Abhängigkeiten zwischen den Operationen und Komponenten dargestellt. Die Einteilung der Komponenten des Montageassistenten erfolgt hierbei orientiert an den Operationen. Die Komponente „Manipulator“ beinhaltet z. B. den Verfahrwagen, die Absteckung am Fahrzeug, das Bedienpanel und die Sicherheitsscheibe des Manipulators. Ein Schrauber wird ebenso als Einheit bestehend aus z. B. Flansch, Spindel, Schlüsselkopf und Schraubersteuerung betrachtet. Weitere Komponenten sind z. B. der Roboter sowie optional ein Kamerasystem oder eine Kraft-Momenten-Sensorik.

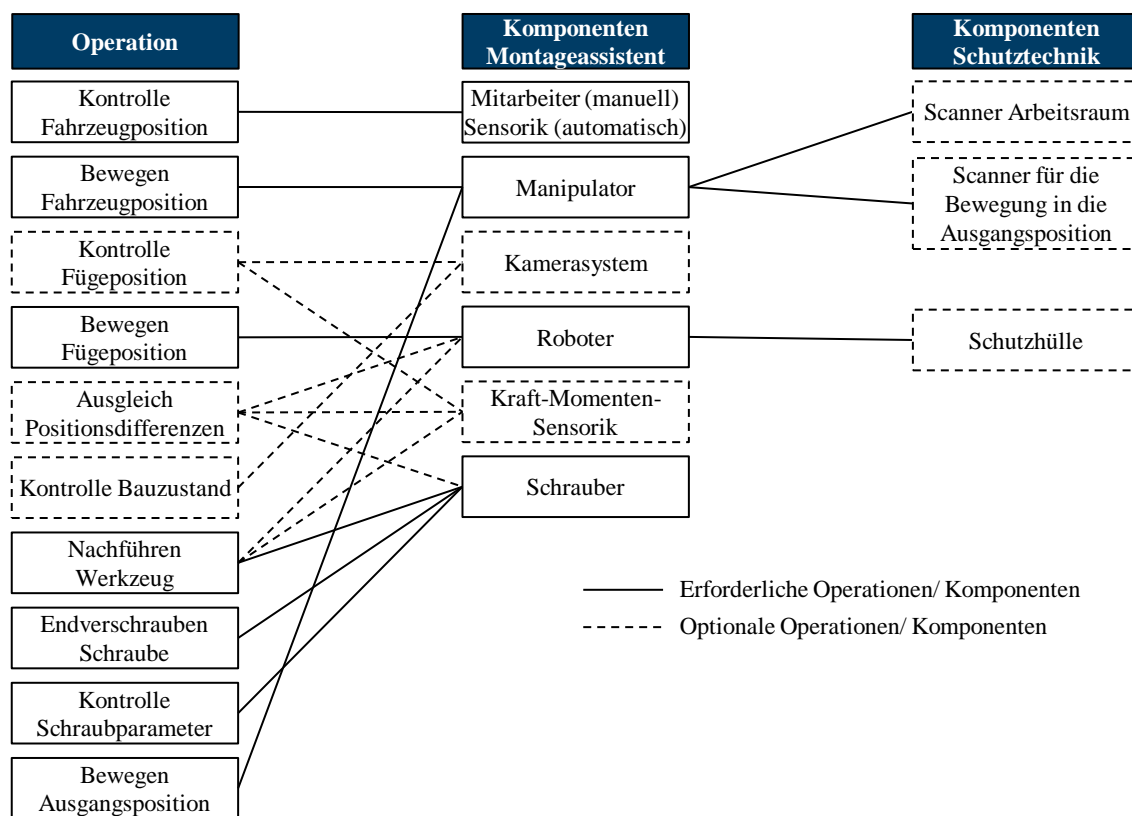


Abbildung 59: Architektur Funktionsgruppe Montageassistent

Für die einzelnen Komponenten können unterschiedliche Alternativen in Frage kommen. Die Komponente „Manipulator“ kann wie in der Abbildung 58 für Teilprozesse im vorderen Innenraum an den Türscharnieren oder mit anderen Absteckungsmechaniken am hinteren Türausschnitt, Vorderwagen und Hinterwagen abgesteckt werden. Ebenso sind Absteckungen für Teilprozesse am Fahrzeugunterboden möglich. Des Weiteren können für Roboter und Schrauber Alternativen betrachtet werden. Der Manipulator ist aufgrund seiner Traglast vor allem für Leichtbauroboter ausgelegt. Beispiele möglicher Leichtbauroboter sind u. a. UR3e, UR5e oder auch UR10e von dem Hersteller Universal Robots sowie iiwa7 oder

iiwa14 von dem Hersteller Kuka. Da im Rahmen der Methodenanwendung zunächst ausschließlich die Grundzüge der Methode untersucht werden sollen, wird in dieser Arbeit nur eine begrenzte Anzahl an Alternativen berücksichtigt.

Die notwendigen Operationen sind, neben der Funktionsgruppe und den Komponenten, stark von den Teilprozessen abhängig. Für Teilprozesse mit einer hohen Toleranz der Fügeposition kann z. B. die Operation „Kontrolle Fügeposition“ oder „Ausgleich Positionsdifferenzen“ erforderlich sein. Falls die Chance besteht, dass die Fügeposition von anderen Bauteilen verdeckt werden kann oder Bauteile nicht korrekt montiert werden, ist optional die Operation „Kontrolle Bauzustand“ ebenfalls erforderlich.

### **Regeln zur Konfiguration des Montageassistenten**

Ausgehend der Erfahrungen mit der Funktionsgruppe des Montageassistenten sind Regeln aufzustellen, nach denen die Konfigurationen der Anlagenkonzepte des Montageassistenten erfolgen können. Zur Ableitung der Regeln sind die Fähigkeiten der Funktionsgruppe analysiert sowie die Schnittstellen einer jeden Komponente zu anderen Komponenten, der Struktur und dem Fahrzeug untersucht. Erste Regeln für die Auswahl eines Manipulators sind als Beispiel in dem Anhang 8, der Tabelle 18 aufgeführt. Durch eine weitere Untersuchung der Eigenschaften des Manipulators z. B. durch Versuche können diese Regeln weiter detailliert werden.

### **9.1.2 Schraubprozesse – Kategorie A und B**

Wie in Kapitel 6.1 beschrieben ist die Methode für jeden bzw. ähnliche Montagelinienabschnitte im Einzelnen anzuwenden. Im Rahmen der Anwendung in diesem Kapitel werden folgend Schraubprozesse der Montagelinienabschnitte eins und zwei betrachtet. Diese Montagelinienabschnitte befinden sich vor dem Fahrwerkeinbau und besitzen beide die gleiche Fördertechnik, weshalb diese vereinfacht als gleich angesehen wird. Des Weiteren werden ausschließlich Schraubprozesse der Kategorie A und B betrachtet, um den Modellierungsaufwand im Rahmen dieser Arbeit zu reduzieren und da für das Zuführen und Endverschrauben mit dem Montageassistenten noch weitere Erfahrungen aus Versuchen erforderlich sind.

In der Abbildung 60 sind die Positionen der Schraubprozesse grob dargestellt. Eine detaillierte Aufschlüsselung der Schraubprozesse inklusive ihrer Attribute ist der Tabelle 19, Tabelle 20 und Tabelle 21 aus dem Anhang 9 zu entnehmen. Zur Beschreibung der Fügeposition sind zum einen die Koordinaten der Fügepositionen ermittelt. Zum anderen sind die Schraubprozesse abhängig ihrer Fügeposition Bereichen zugeteilt, ähnlich des Ansatzes von (Weidemann 2017). Die Einteilung der Bereiche richtet sich hierbei im Groben nach den Fähigkeiten der Funktionsgruppe des Montageassistenten. Mit dem Montageassistenten ist es möglich Fügeprozesse im vorderen Innenraum, hinteren Innenraum, Vorderwagen, Hinterwagen und Unterboden durchzuführen. Mit einem einfachen Manipulator (siehe Abbildung 58, S.134) können im Innenraum ausschließlich die Fügeprozesse einer Fahrzeugseite

ausgeführt werden. Für die Einteilung der Bereiche ist es somit sinnvoll, eine Unterscheidung der Fahrzeugseiten vorzunehmen. Prozesse die sich jedoch mittig bzw. in der Nähe der Fahrzeugmitte befinden, können ausgehend beider Fahrzeugseiten durchgeführt werden. Daher werden die Bereiche mittig des Fahrzeuges, mit Ausnahme des Vorder- und Hinterwagens, keiner Fahrzeugseite zugewiesen und separat unterteilt.

Neben der Einteilung abhängig der Fahrzeugseite richtet sich die Einteilung nach den Störkonturen wie z. B. der A-, B- und C-Säule, welche die Erreichbarkeit beeinträchtigen. Aus diesem Grund werden ebenfalls mehrere Bereiche wie z. B. der Vorderwagen (Bereich 1), der vordere Innenraum (Bereich 2), der hintere Innenraum (Bereich 4) und der Hinterwagen (Bereich 6) unterteilt. Wie auch bei der Aufteilung abhängig der Fahrzeugseite werden die Übergänge zwischen den Bereichen separat unterteilt. Bereich 3 ist z. B. ausgehend des vorderen als auch hinteren Innenraums erreichbar. Ein Montageassistent für den vorderen Innenraum kann z. B. die Bereiche B2, B3, C2 und C3 abdecken (siehe Abbildung 60).

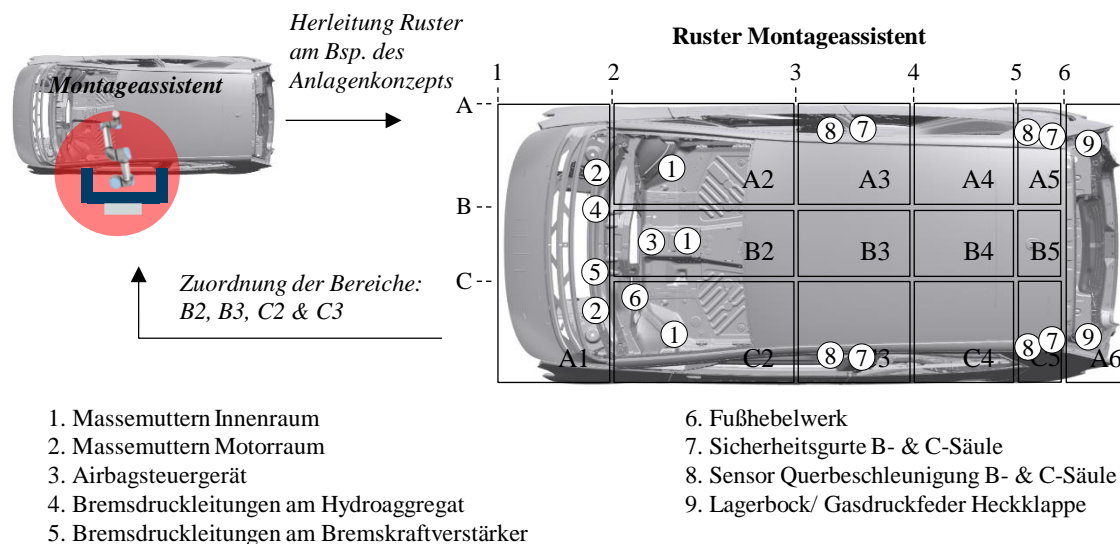


Abbildung 60: Ruster für die Schraubprozesse des Montageassistenten

Die Einteilung der Bereiche für Montagelinienabschnitte mit Gehänge unterscheidet sich zu der des Skids. Denn bei diesen Montagelinienabschnitten können Ressourcen ebenfalls unterhalb des Fahrzeuges positioniert werden. Für die Betrachtung weiterer Anlagenkonzepte, neben dem Montageassistenten, sind erneut spezifische Ruster zu definieren.

Für die Analyse der Fügerangfolge und Einteilung der Prozesse in Gruppen (siehe Schritt 3, Kapitel 8.2.5) sind die Prozesse wie in der Abbildung 61 im Bezug zueinander und zum Montagelinienabschnitt dargestellt. Ausgehend dessen sind Gruppen von Prozessen definiert (siehe Anhang 9) die parallel erfolgen können. Exemplarisch kann der Prozess Airbagsteuergerät lösen und schrauben erst nach dem Türenausbau und muss spätestens vor dem Cockpit und Kabelstrang ausgeführt werden.

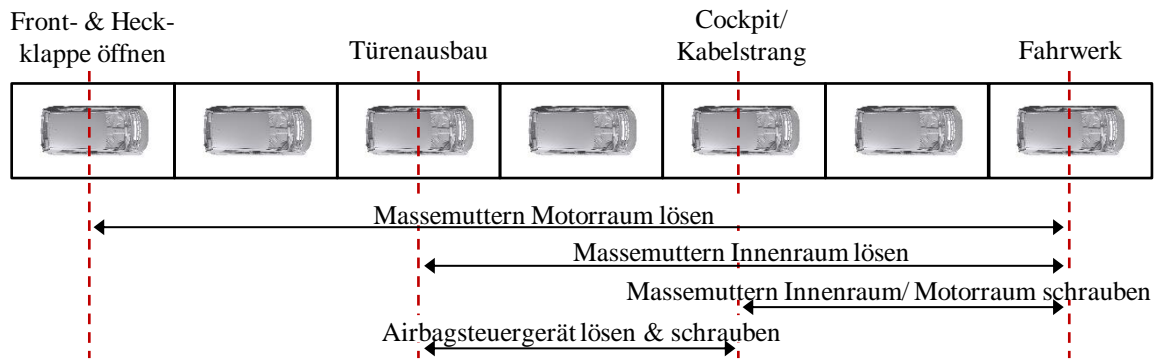


Abbildung 61: Fugerangfolge Massemuttern & Airbagsteuergerät

## 9.2 Anwendung der fähigkeitsbasierten Planung

Die Ergebnisse der Anwendung der fähigkeitsbasierten Planung werden im Folgenden dargestellt und diskutiert. Für eine erste prototypische Anwendung der fähigkeitsbasierten Planung ist dabei zunächst Excel mit der Programmiersprache „Virtual Basic for Applications“, kurz VBA, verwendet worden. Eine weiterführende Implementierung der Methode hängt anschließend von den bereits bestehenden Systemen der EO ab. Für die Datenbeschaffung sind hierbei vor allem Produktdatenmanagementsysteme von Bedeutung, die eine Vielzahl der erforderlichen Daten und Informationen besitzen. Eine Implementierung der Methode wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

### 9.2.1 Konfigurierte Anlagenkonzepte

Insgesamt konnten mit den Prozessen aus dem Fallbeispiel 13 Anlagenkonzepte bzw. Montagestationen konfiguriert werden (siehe Anhang 10). Das aufgeführte Kosten-Nutzen-Verhältnis, kurz KNV, wird im Rahmen der Datensicherheit in dieser Arbeit nur normiert aufgeführt. Im Detail soll exemplarisch auf die folgenden drei Anlagenkonzepte die einen Montageassistenten für den Innenraum verwenden näher eingegangen werden:

1. Massemuttern Innenraum lösen & Airbagsteuergerät lösen/ schrauben
2. Sicherheitsgurte schrauben
3. Fußhebelwerk schrauben

#### **Massemuttern Innenraum lösen & Airbagsteuergerät lösen/ schrauben**

Die Anwendung der Methode hat gezeigt, dass im Innenraum eine Bündelung der Massemuttern mit dem Airbagsteuergerät sinnvoll ist. So konnten z. B. drei Montagestationen durch Bündelung der Prozesse der Massemuttern im Innenraum und des Airbagsteuergeräts konfiguriert werden. Die einzelnen Bündelungen zeigen jedoch zum Teil Überschneidungen von Teilprozessen auf. Zur Automatisierung möglichst vieler Teilprozesse stellen sich daher die Bündelungen zwei und drei in Kombination als geeignet heraus.

Für jede Bündelung und Montagestation sind, aufgrund der gleichen Anforderungen und des deterministischen Vorgehens (siehe Kapitel 8.2.4), identische Komponenten ausgewählt



worden. Die Funktionsgruppe besteht wie in der Abbildung 62 dargestellt aus einem Manipulator für den vorderen Innenraum, welcher manuell von einem Mitarbeiter abgesteckt wird. Für die Durchführung des Prozesses ist ein UR10e Roboter sowie der Schrauber Apex 38 ausgewählt worden.

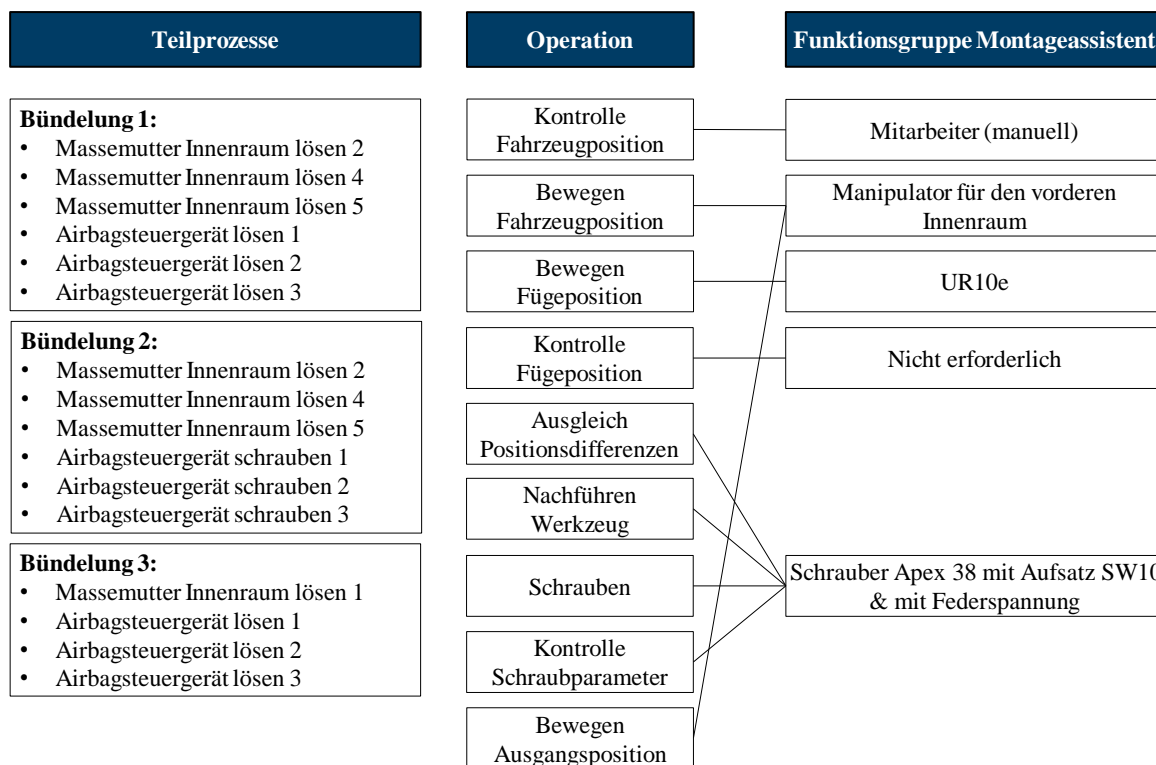


Abbildung 62: Anlagenkonzept Massemuttern Innenraum lösen & Airbagsteuergerät

Ob zusätzliche Sensorik wie z. B. ein Kamerasystem für die Kontrolle der Fügeposition erforderlich ist, stellt sich abhängig des Schraubers und dem Produkt heraus. Wenn der Schrauber über die geometrische Gestaltung des Kraftangriffs die Toleranzen der Fügeposition bzw. Positionsdifferenzen nicht ausgleichen kann, ist ein Kamerasystem oder eine Kraft-Momenten-Sensorik für sog. Suchfahrten vorzusehen. Zur Überprüfung des Anlagenkonzepts sind in einem Testaufbau die theoretisch möglichen Positionsdifferenzen der Massemuttern und der Muttern des Airbagsteuergeräts ausgehend einer Toleranzkettensimulation nachgestellt worden. Mit diesem Testaufbau sowie dem aus der fähigkeitsbasierten Planung ausgewählten Schrauber wurden die Fähigkeiten des Schraubers im Detail untersucht (siehe Abbildung 63). Es hat sich gezeigt, dass der Schrauber und der verwendete Aufsatz aufgrund der geometrischen Paarung zwischen Schrauber und Mutter einen ausreichenden Toleranzausgleich besitzt, um die Positionsdifferenzen auszugleichen. Eine zusätzliche Kamera und Kontrolle der Fügepositionen ist damit nicht erforderlich.



Abbildung 63: Untersuchung des Toleranzausgleichs eines Schraubers für das Lösen von Massemuttern

### Sicherheitsgurte schrauben

Die fähigkeitsbasierte Konfiguration hat gezeigt, dass sich mit einem Montageassistenten eine Vielzahl von Schraubprozessen der Sicherheitsgurte bündeln lassen. Insgesamt haben sich drei verschiedene Bündelungen für die Sicherheitsgurte ergeben. Die Bündelung eins zeigt so eine Zusammenfassung der Sicherheitsgurte der linken und rechten B-Säule. Hingegen besitzen die Bündelungen zwei und drei ausschließlich die Sicherheitsgurte einer Fahrzeugseite. Für die unterschiedlichen Bündelungen sind ebenso unterschiedliche Montagestationen konfiguriert worden. Für die Bündelung eins ist somit ein Manipulator für den hinteren Innenraum mit einem zusätzlichen Ausleger des Roboters in den Innenraum hinein notwendig. Die Bündelungen zwei und drei benötigen keinen Ausleger, da sich sämtliche Teilprozesse auf einer Fahrzeugseite in einem Bereich befinden.

Neben der erforderlichen Reichweite ist aufgrund des hohen Drehmoments von 40 Nm die Auswahl auf einen UR10e gefallen. Aufgrund des hohen Drehmoments der Sicherheitsgurte ist zudem ein Apex 61 Schrauber gewählt worden. Da es sich bei dem Schrauber der Sicherheitsgurte um einen Innenvielzahn (N10 Kraftangriff) handelt, ist eine Zentrierung des Schraubers ausgehend der Geometrie schwierig. Aus diesem Grund ist für die Verschraubung der Sicherheitsgurte, über die Definition von Regeln (siehe Kapitel 4.3.2), ein zusätzliches Kamerasystem gewählt worden. Mit Hilfe dieser Kamera soll eine Kontrolle der Fügeposition erfolgen. Es besteht die Annahme, dass ein weiterer Ausgleich von Positionsabweichungen nicht erforderlich sein wird. Dies ist jedoch in mehreren Tests der Montagestation und des Schraubers zu evaluieren.

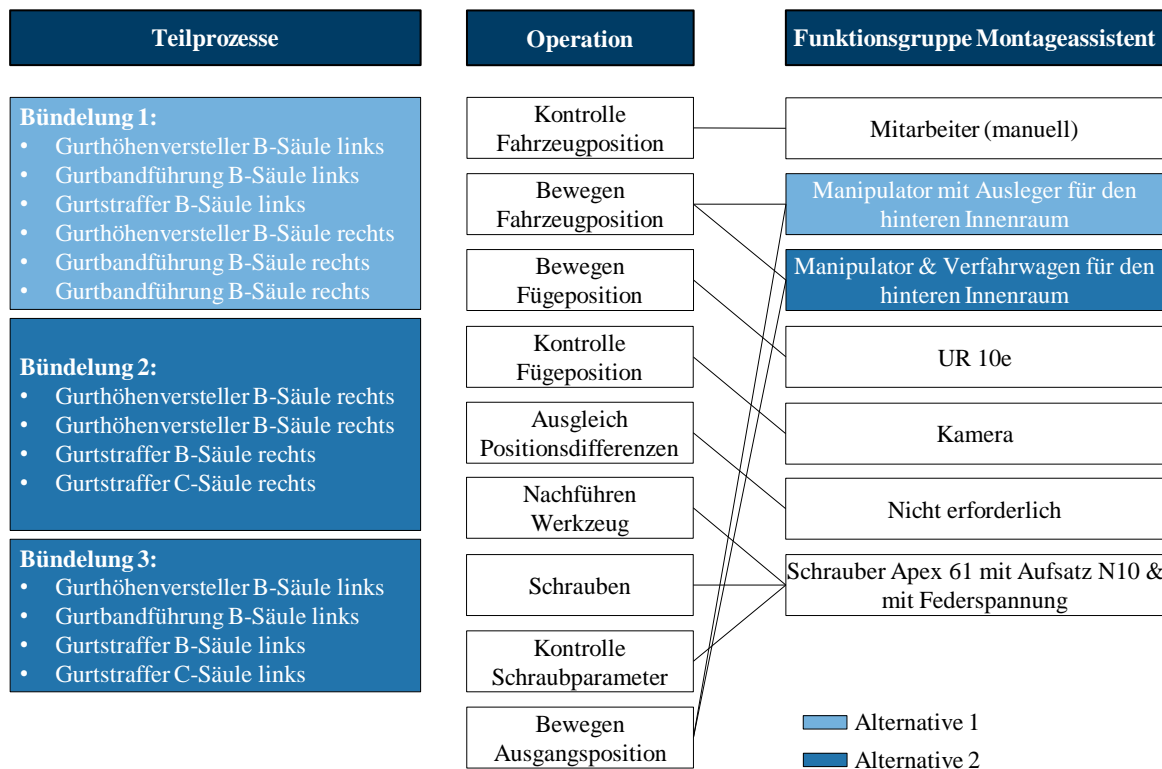


Abbildung 64: Anlagenkonzepte Sicherheitsgurte

### Fußhebelwerk schrauben

Ein konfiguriertes Anlagenkonzept beinhaltet die Verschraubung der fünf Schraubprozesse des Fußhebelwerks. Dieses besteht aus einem Manipulator für den vorderen Innenraum mit einer Absteckung an den Türscharnieren, einen UR10e Roboter sowie einen Schrauber mit einem SW13 Aufsatz (siehe Abbildung 65). Das Anlagenkonzept ist zudem in Versuchen weiter untersucht worden. Hierbei hat sich gezeigt, dass die Fügepositionen ohne ein extra Kamerasystem angefahren werden können und der Schrauber einen ausreichenden Toleranzsaugleich besitzt, um die Positionsdifferenzen auszugleichen. In dem manuellen Prozess werden die Muttern des Fußhebelwerks bereits mit mehreren Umdrehungen geheftet wodurch für das Endverschrauben der Federweg des Schraubers zum Nachführen des Schraubers ausreicht.

Die fähigkeitsbasierte Konfiguration sowie die Versuche haben des Weiteren ergeben, dass als Roboter ein UR10e aufgrund seiner höheren Reichweite erforderlich ist. Mit diesem können Schraubprozesse bis mittig des vorderen Innenraums ausgeführt werden.

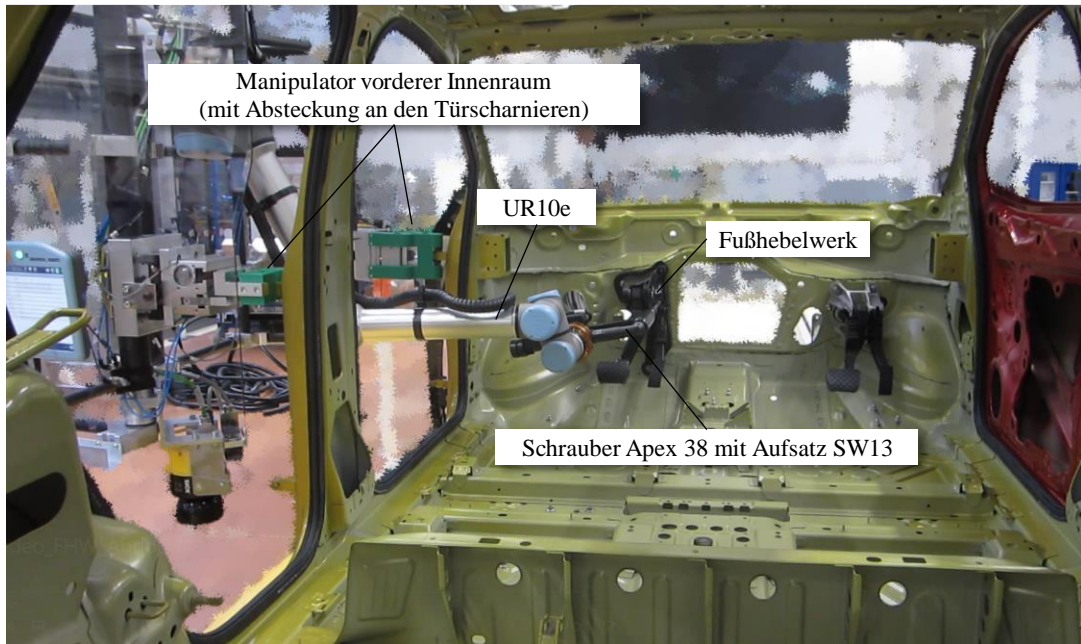


Abbildung 65: Versuche Fußhebelwerk schrauben

Neben den Anlagenkonzepten die einen Montageassistenten für den Innenraum verwenden, konnten eine Reihe von Anlagenkonzepten mit einem Montageassistenten für den Vorderwagen konfiguriert werden. In der Abbildung 66 sind diese exemplarisch noch einmal zusammen mit einem Montageassistenten für den Vorderwagen aufgeführt. Eine Übersicht der einzelnen Teilprozesse und Komponenten ist dem Anhang 10 und 11 zu entnehmen.

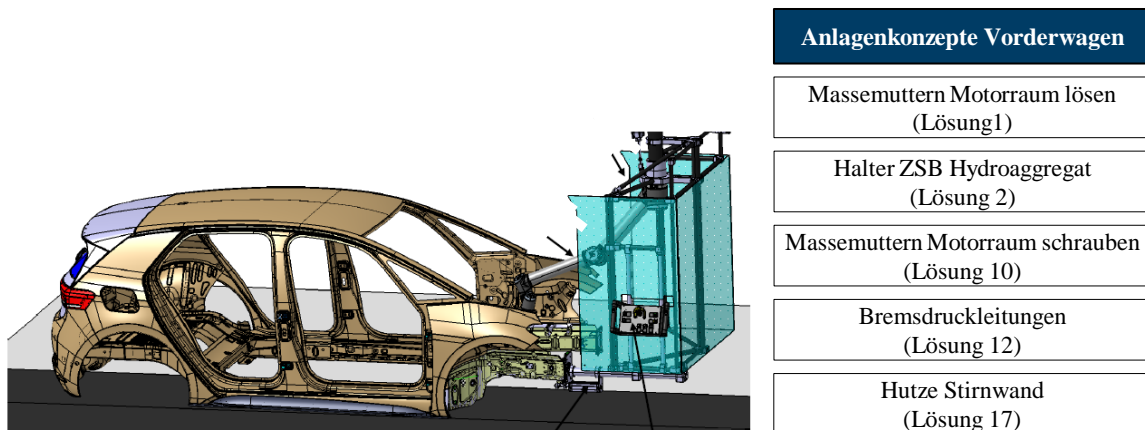


Abbildung 66: Anlagenkonzepte für den Vorderwagen

## 9.2.2 Integrationskonzept für den Montagelinienabschnitt 1 und 2

Neben den 13 Montagestationen aus der fähigkeitsbasierten Planung (siehe Anhang 10) werden für die Entwicklung eines Integrationskonzepts weitere Montagestationen für Schraubprozesse der Kategorie C berücksichtigt. Für die Automatisierung von Schraubprozessen der Kategorie C werden im Detail Montagestationen für die Schraubprozesse: „Dachreling schrauben links“, „Dachreling schrauben rechts“ und „Hutze Stirnwand schrauben“ aufge-

nommen. Ebenso werden Montagestationen für den Fügeprozess „Rollforming“ berücksichtigt wie z. B. das Rollforming der Türendichtungen links und rechts als auch das Rollforming der Heckklappendichtung (siehe Anhang 11, Tabelle 24). Entsprechend des Detailkonzepts aus Kapitel 8.3.2 zur Entwicklung eines Integrationskonzepts sind die Montagestationen nach ihrer Eignung für den Montagelinienabschnitt gefiltert worden. Anschließend sind die Montagestationen abhängig ihrer Prozesse im Layout positioniert worden, analog Abbildung 61 Kapitel 9.1.2.

### **Prüfung des Potentials der Mehrfachverwendung**

Bei der Prüfung des Potentials für eine direkte bzw. indirekte Bündelung (siehe Kapitel 8.3.2) hat sich gezeigt, dass bei Montagestationen des Montageassistenten vor allem die Anlagensteuerung für eine Mehrfachverwendung in Frage kommt. Über die Bandoberkonstruktionen können z. B. Leitungen für Profinet und Einspeisung zu den einzelnen Montagetakten verlegt werden, um dadurch mehrere Montagestationen anzusteuern. Bei der Schutztechnik besteht ebenso ein Potential ausgehend der direkten Bündelung. Denn wenn auf beiden Fahrzeugseiten ein Montageassistent abgesteckt wird, ist ein Eindringen des Mitarbeiters in den Arbeitsbereich des Roboters nicht mehr möglich und muss nicht mit Hilfe eines Scanners überwacht werden (siehe Kapitel 9.1.1). Da in der Anwendung der Methode überwiegend Automatisierungen ohne Bereitstellungssystem betrachtet wurden, ergibt sich hinsichtlich der Mehrfachverwendung von Bereitstellungssystemen kein Potential.

### **Auswahl und Bewertung von Montagestationen – Montagelinienabschnitt 1**

Für das Integrationskonzept sind verschiedene Varianten untersucht worden (Anhang 12, siehe Tabelle 25). Für jede Variante wurde zudem das Kosten-Nutzen-Verhältnis entsprechend Kapitel 7.4 ermittelt. Ausgehend der ersten Auswahl von Montagestationen wurde in einer folgenden Variante die Montagestation 17 wieder entfernt, wodurch sich das Kosten-Nutzen-Verhältnis verbessert hat. Anschließend wurde ausgehend dieser Variante untersucht, wie sich das Integrationskonzept verhält, wenn die Montagestation 13 hinzugefügt wird. Für die Montagestation 13 ist jedoch ein zusätzlicher Takt notwendig, da diese zusammen mit der Montagestation eins zwischen dem Podest und dem Türenausbau positioniert werden müsste (siehe Abbildung 67). Bei der betrachteten Montagelinie handelt es sich jedoch um eine Brownfield Montagelinie, also einer bestehenden Struktur, weshalb diese Erweiterung aus technischer Sicht auszuschließen ist.

Wie in der Abbildung 67 dargestellt, ist als Integrationskonzept die Variante zwei gewählt worden. Diese hat sich hinsichtlich der Bewertung als beste, realisierbare Variante herausgestellt. Am Anfang des Montagelinienabschnittes ist damit eine singuläre Montagestation 1 positioniert worden. In der Mitte des Montagelinienabschnittes konnten hingegen mehrere Montagestationen zu zwei Montageeinheiten gebündelt werden. In diesen Montageeinheiten ist es somit folgend möglich eine Anlagensteuerung mehrfach zu verwenden. Die Montage-

einheit eins besteht z. B. aus dem Schrauben der Dachring links und rechts (Montagestationen 14 und 15), Rollforming der Heckklappendichtung (Montagestation 16) und Lösen des Airbagsteuergeräts und der Massemuttern im Innenraum (Montagestation 3). Da der Montageassistent ca. 1,5 Takte an Fläche benötigt, erstreckt sich die Montageeinheit hierbei auf ca. vier Takte.

Die Montageeinheit zwei erstreckt sich insgesamt über acht Takte und beinhaltet Montagestationen für das Schrauben des Airbagsteuergeräts (Montagestation 9), Rollforming der Türrendichtungen links und rechts (Montagestationen 18 und 19) sowie Schrauben des Fußhebwerks (Montagestation 4). Eine weitere örtliche Bündelung der Montagestationen war besonders aufgrund zwischengelagerter Prozesse sowie Logistikanstellungen nicht möglich.

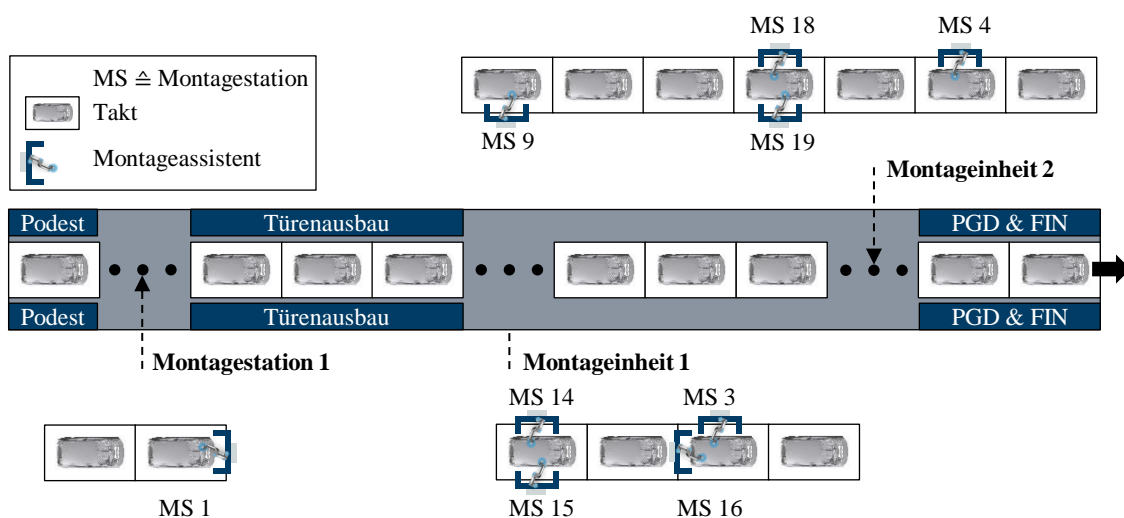


Abbildung 67: Integrationskonzept Variante 2 – Montagelinienabschnitt 1

### Auswahl und Bewertung von Montagestationen – Montagelinienabschnitt 2

Wie auch für den Montagelinienabschnitt eins sind verschiedene Varianten von Integrationskonzepten im Rahmen einer Grobtaktung untersucht worden. Zunächst ist eine Variante eins bestehend aus zwei singulären Montagestationen und einer Montageeinheit mit drei gebündelten Montagestationen ausgewählt worden. Diese ist in einer zweiten Variante um eine weitere singuläre Montagestation erweitert worden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Erweiterung zu einer Verschlechterung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses führt.

Basierend auf der ersten Variante ist das Integrationskonzept für den Montagelinienabschnitt zwei (siehe Abbildung 68) ausgewählt worden. Das Fahrzeug bewegt sich in diesem Montagelinienabschnitt, im Gegensatz zum ersten Montagelinienabschnitt, von rechts nach links. Entsprechend ist im Montagelinienabschnitt als erstes eine singuläre Montagestation für das Schrauben der Bremsdruckleitungen (Montagestation 12) positioniert worden. Anschließend konnte eine weitere singuläre Montagestation für das Schrauben der Massemuttern im Innenraum (Montagestation 11) integriert werden. Am Ende des Montagelinienabschnittes

konnten die Montagestationen für das Schrauben der Sicherheitsgurte links und rechts (Montagestationen 7 und 8) sowie für das Schrauben der Massemuttern im Motorraum (Montagestation 10) zu einer Montageeinheit gebündelt werden.

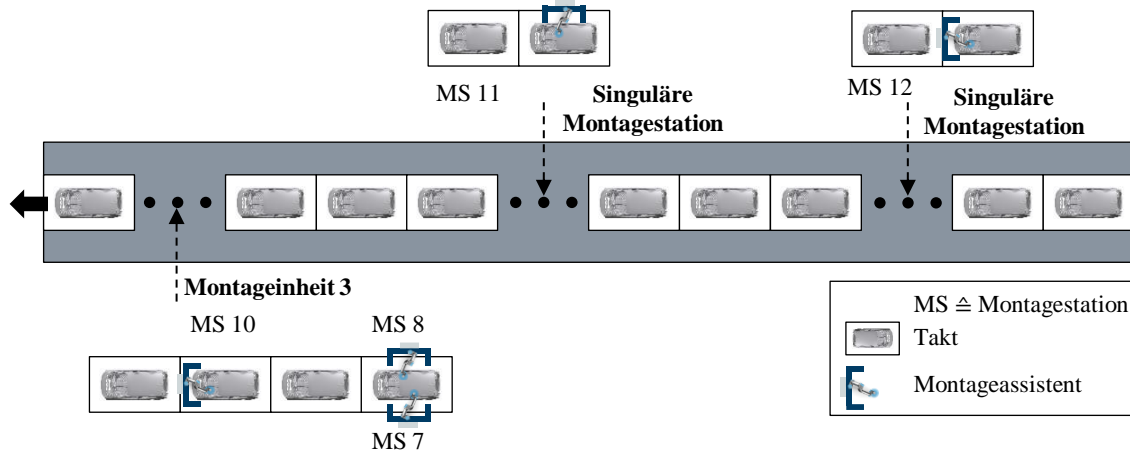


Abbildung 68: Integrationskonzept Variante 2 – Montagelinienabschnitt 2

### 9.2.3 Diskussion der fähigkeitsbasierten Planung

Ausgehend der Anwendung der Methode gilt es die noch offenen Fragestellungen aus Kapitel 8 zu beantworten. Ebenso soll auf Basis des Kapitels 9.2 auf die Aspekte der Methode eingegangen werden, die sich ausgehend der ersten Anwendung als besonders bedeutend herausgestellt haben.

#### Diskussion offener Fragestellungen

Ausgehend des Kapitels 8.2.3 hat sich die Frage nach der Anzahl an möglichen Startprozessen gestellt, welche für eine Bündelung und dem iterativen Vorgehen in Frage kommen. Die Betrachtung von 64 verschiedenen Schraubprozessen hat gezeigt, dass sich in den Gruppen mit ähnlichen Teilprozessen drei bis zwölf Prozesse befinden. Im Durchschnitt befinden sich dabei fünf bis sechs Teilprozesse in einer Gruppe und kommen als Startiteration in Frage. Für den betrachteten Anwendungsfall hat sich die Untersuchung eines jeden einzelnen Startprozesses zudem als vorteilhaft erwiesen. Bei dem Anlagenkonzept der Bremsdruckleitungen (siehe Lösung 12, Anhang 10) konnte so eine effizientere Bündelung mit optimierten Verfahrenswagen erreicht werden.

Zur Konkretisierung des Optimierungsverfahrens aus Kapitel 8.2.4 ist zum einen die Anzahl an notwendigen Verbesserungsschritten zu untersuchen. Zum anderen ist zu prüfen, ob die Mutation ausschließlich die besten Zeilenlösungen oder auch z. B. die zweit- oder drittbesten Zeilenlösungen berücksichtigen sollte. Für die Analyse der Verbesserungsschritte sind in der Abbildung 69 vier verschiedene Montagestationen (MS) betrachtet und abhängig des Verbesserungsschritts normiert nach dem Kosten-Nutzen-Verhältnis (KNV) bewertet worden. Hierbei ist zu erkennen, dass bereits nach der Eröffnungslösung bzw. den ersten Verbesse-

rungsschritten die beste Lösung erzielt wird. Mit fortlaufenden Verbesserungsschritten divergieren die Lösungen zunehmend zu schlechteren Ergebnissen. Dies macht zum einen deutlich, dass das gewählte Optimierungsverfahren für die Konfiguration geeignet ist und zum anderen, dass nur wenige Verbesserungsschritte für die Konfiguration eines kosteneffizienten Anlagenkonzepts ausreichend sind. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass zur Vereinfachung im betrachteten Anwendungsfall nur wenige verschiedene Komponenten in der fähigkeitsbasierten Planung modelliert wurden. Damit sind ebenfalls nur wenige Regeln und Abhängigkeiten für die Konfiguration und Optimierung zu berücksichtigen. Mit einer steigenden Zunahme an Komponenten und Regeln sind daher die notwendigen Verbesserungsschritte erneut kritisch zu überprüfen.

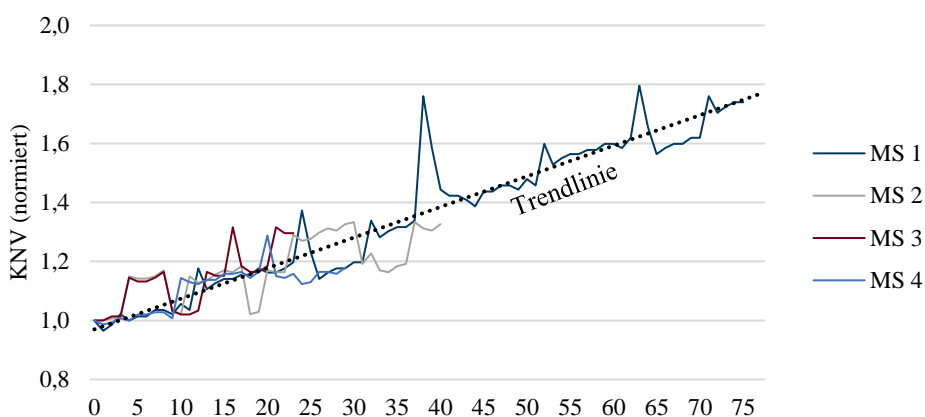


Abbildung 69: Lösungen der Konfiguration bei fortlaufender Optimierung

### Modellierung & Regeln

Die Anwendung der fähigkeitsbasierten Planung hat gezeigt, dass die Konfiguration sehr stark von dem Expertenwissen und den definierten Regeln abhängig ist. Ein erster Abgleich der Eignung von Komponenten für Produkte und Prozesse ist über die Modellierung von Fähigkeiten einfach möglich. Um technisch funktionsfähige Montagestationen zu konfigurieren, ist jedoch die detaillierte Beschreibung von Regeln erforderlich. Für die erste Anwendung sind mit Hilfe von Domain Experten Regeln definiert worden. Diese Regeln sind anschließend mit Hilfe realer Versuche an einem Montageassistenten überprüft worden. Allgemein geht die Methode insbesondere bei ersten Anwendungen mit hohen Planungs- und Modellierungsaufwänden einher. Elementarer Vorteil hierbei ist jedoch, dass auf diese Weise das erworbene Wissen der Planer bewahrt und transferiert werden kann.

### Toleranzen & Toleranzkettensimulationen

Neben der Definition von Regeln und der Überprüfung dieser im Rahmen von Versuchen hat sich gezeigt, dass Ergebnissen aus Toleranzkettensimulationen einer hohen Bedeutung für die Konfiguration von Anlagenkonzepten zuzukommen sind. Mit Hilfe dieser kann bewertet werden, welche Komponenten für die Kontrolle der Fügeposition sowie dem Aus-



gleich der Positionsdifferenzen erforderlich sind. Ausgehend von Toleranzkettensimulationen sind zudem Vorversuche bzgl. der verschiedenen geometrischen Paarungen zwischen Verbindungselement und Werkzeug zu empfehlen, analog der Vorversuche des Schraubprozesses Massemuttern Innenraum lösen & Airbagsteuergerät lösen/ schrauben (siehe Kapitel 9.2.1). Hierüber können die Fähigkeiten der Komponenten im Detail für den spezifischen Schraubprozess herausgestellt werden. Insbesondere sind in weiteren Arbeiten die Fähigkeiten von Kamerasystemen über Versuche weiter zu untersuchen und zu spezifizieren. Bisher werden diese in der Anwendung der Methode nur vereinfacht berücksichtigt.

### Zuordnung- & Optimierungsvorgehen

Die Anwendung der fähigkeitsbasierten Planung hat des Weiteren gezeigt, dass zum Teil eine detailliertere Betrachtung des Schraubers innerhalb der Konfiguration von Anlagenkonzepten (siehe Kapitel 8.2) sinnvoll ist. Die Fähigkeiten des Schraubers können zum Teil einzelnen Elementen wie z. B. dem Schlüsselkopf, Abtrieb, Bit oder dem Flansch zugeordnet werden (siehe Abbildung 70). Der Einfluss der einzelnen Elemente des Schraubers ist über Versuche zu ermitteln. Für den Ausgleich von Toleranzen kann z. B. bereits ein schwimmender Flansch ausreichend sein. Für weitere Planungen sind daher im Detail Regeln für die Konfiguration des Schraubers zu entwickeln, mit dem dieser analog eines Baukastens zusammengesetzt werden kann.

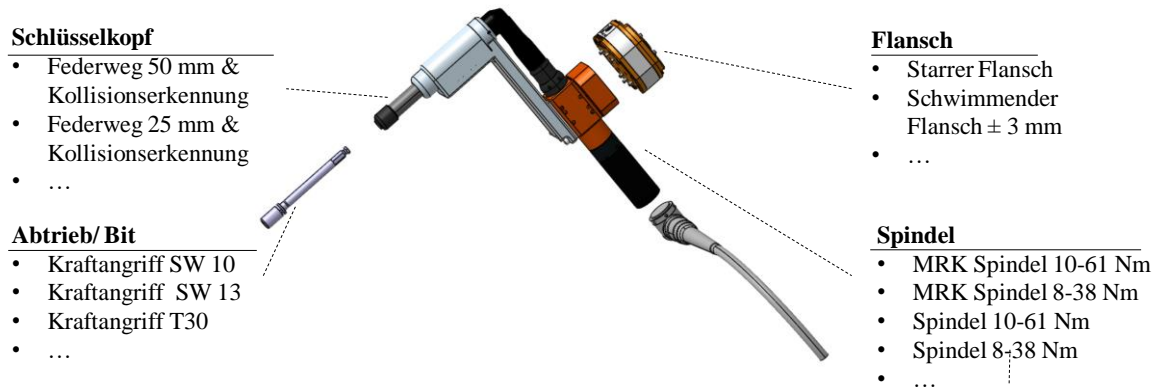


Abbildung 70: Konfigurationsvarianten eines Schraubers (exemplarisch)

Aufgrund des deterministischen Optimierungsvorgehens sowie der Betrachtung einer geringen Anzahl an Alternativen innerhalb der Konfiguration haben sich in der Anwendung schnell Vorzugslösungen herausgestellt. So wurde z. B. zumeist der gleiche Robotertyp ausgewählt. Im Hinblick auf weitere Alternativen von Modulen wird jedoch ebenfalls erwartet, dass sich auch hierbei wieder Vorzugslösungen einstellen werden. Das Vorgehen ist im Detail für die Wiederverwendung von Anlagenkonzepten ausgelegt und ist aus diesem Grund weniger für die Entwicklung neuer, innovativer Anlagenkonzepte heranzuziehen. Letztere sind jedoch stetig mit bereits bestehenden, wiederverwendbaren Anlagenkonzepten gegenüberzustellen. Hierbei ist zu überprüfen, ob für einzelne Anwendungen nicht ein neues, we-

niger wiederverwendbares Anlagenkonzept geeigneter wäre. Denn allgemein besteht innerhalb der Wiederverwendung von Anlagenkonzepten ein Spannungsfeld zwischen dem Overengineering und der Entwicklung neuer, singulärer Lösungen für spezifische Anforderungen. Sowohl das Overengineering eines Anlagenkonzepts bzw. Baukastens als auch die Entwicklung einer Vielzahl individueller Lösungen kann zu signifikant höheren Kosten führen (Herrmann et al. 2015). Es ist daher innerhalb der Planung stetig zu hinterfragen, wann eine Abweichung von wiederverwendbaren Anlagen bzw. Modulen sinnvoll ist.

### **Bündelung von Prozessen & Modulen**

Für die Planung effizienter Anlagen bzw. Anlagenkonzepte ist insbesondere die Bündelung von Prozessen in einer Anlage sowie die Bündelung von Modulen innerhalb der Montagelinie hervorzuheben. Zum einen konnte hierdurch die Auslastung von Anlagen systematisch erhöht werden. Zum anderen stellt sich ausgehend der örtlichen Bündelung ein geringerer Ressourcen- und Flächenbedarf für die Automatisierung ein. Innerhalb des Integrationskonzepts konnten somit eine Vielzahl von Montagestationen in der Montagelinie integriert und zu Montageeinheiten gebündelt werden. Neben der eigentlichen fähigkeitsbasierten Planung stellt das Konzept der Bündelung und Mehrfachverwendung dieser Arbeit einen der bedeutendsten Beiträge für zukünftige Planungen dar. Daher wird empfohlen auch in konventionellen Planungen abseits der fähigkeitsbasierten Planung das Konzept der Bündelung und Mehrfachverwendung aufzugreifen.

### **9.3 Anwendung der Analyse der Wiederverwendbarkeit**

Ausgehend der vorherigen Anwendung der fähigkeitsbasierten Planung gilt es, die Wiederverwendbarkeit der konfigurierten Anlagenkonzepte zu untersuchen (siehe 6.1). Die Konfiguration von Anlagenkonzepten ist in dieser Arbeit anhand der Funktionsgruppe des Montageassistenten (siehe Kapitel 9.1.1) durchgeführt worden. Daher soll die Analyse der Wiederverwendbarkeit folgend ebenfalls exemplarisch am Beispiel des Montageassistenten erfolgen. Hierfür wird zunächst das Risiko der Rekonfiguration analysiert und bewertet. Anschließend wird auf die übrigen Wiederverwendungskriterien eingegangen und die Wiederverwendbarkeit der Ebene der Montagestation bewertet.

#### **9.3.1 Risiko der Rekonfiguration des Montageassistenten**

Auf Basis der konfigurierten Montagestationen sowie dem Integrationskonzept aus Kapitel 9.2 ist das Risiko der Rekonfiguration für den Montageassistent analysiert worden. Nach dem Vorgehen aus Kapitel 7.1 sind hierzu zunächst die Abhängigkeiten zwischen den Modulen und Attributen untersucht sowie der theoretische Rekonfigurationsaufwand für den Austausch und der Anpassung von Modulen bewertet worden. In der Abbildung 71 sind hierzu die Rekonfigurationsaufwände für den Austausch von Modulen des Montageassistenten dargestellt. Hierbei wurden jeweils die maximalen Aufwände aus Mechanik, Elektrik

und Software betrachtet. Mit 62,6 % stellt die Rekonfiguration bzw. der Austausch des Manipulators den mit Abstand größten Aufwand dar. Grund hierfür ist zum einen der hohe mechanische Aufwand. Zum anderen verlaufen viele elektrische Leitungen über den Manipulator und sind neu zu verlegen.

Neben dem Rekonfigurationsaufwand sind außerdem die Eintrittswahrscheinlichkeiten von zukünftigen Szenarien zusammen mit Experten aus der Entwicklung und der Produktion bewertet worden. Hierbei haben sich systematisch die drei aufgeführten Szenarien wiederkehrend ergeben (siehe Abbildung 71). Aufgrund der restriktiven Platzverhältnisse in der Automobilendmontage sowie der hohen Wahrscheinlichkeit weiterer Fahrzeugvarianten und den damit einhergehenden Zusatzzumfängen von Montageprozessen, besteht die Wahrscheinlichkeit, dass die verfügbaren Taktlängen sowie der Bauraum am Fahrzeug für die Automatisierung kleiner werden. Für Bereiche am Anfang und Ende eines Montagelinienabschnittes wurde zusammen mit Experten aus Entwicklung und Produktion eine Wahrscheinlichkeit von 10 % eines kleineren verfügbaren Bauraums abgeschätzt. Hingegen wird erwartet, dass mittig des Montagelinienabschnittes mit einer Wahrscheinlichkeit von bis zu 30 % Bauräume nicht länger verfügbar sind. Beide Szenarien wirken sich auf die Komponente des Manipulators aus, welche charakteristisch für den Platzbedarf des Montageassistenten ist.

Neben der Ebene des Montageassistenten sind zusätzliche Bewertungen auf der Komponentenebene möglich. Hierüber ist zu prüfen, ob z. B. bei dem Manipulator Anpassungen aufgrund neuer Fahrzeuggeometrien oder Förderhöhen erforderlich sind. Die mechanische Abstimmung zwischen Fahrzeug und Manipulator ist im Falle des Montageassistenten jedoch flexibel ausgelegt (siehe Abbildung 58, Kapitel 9.1.1), weshalb eine Anpassung bei neuen Fahrzeuggeometrien nicht direkt notwendig ist.

Ausgehend des Produkts und Prozesses konnten nur wenige Szenarien mit neuen Anforderungen identifiziert werden. Hintergrund ist, dass für Schraubprozesse fortgeschrittene Standards bestehen und in der Entwicklung und Produktion etabliert sind. Bis auf wenige Ausnahmen, wie z. B. der Bremsdruckleitung oder dem Fußhebelwerk, sind neue Anforderungen ausgehend neuer Arten von Verbindungselementen als unwahrscheinlich bewertet worden. Das durchschnittliche Risiko der Rekonfiguration des Montageassistenten konnte daher mit 31,1 % bewertet werden. Einen Ausreißer stellt hierbei vor allem die Lösung zwölf der Bremsdruckleitung dar, denn hier besteht die Wahrscheinlichkeit einer Verlagerung des Montageumfangs in eine separate Vormontage, womit das Anlagenkonzept des Montageassistenten ungeeignet wäre. Allgemein ist die Lösung des Montageassistenten mit anderen Lösungen aus Kapitel 2.3.1 zu vergleichen, um zusätzlich eine qualitative Einordnung des Risikos zu erhalten.

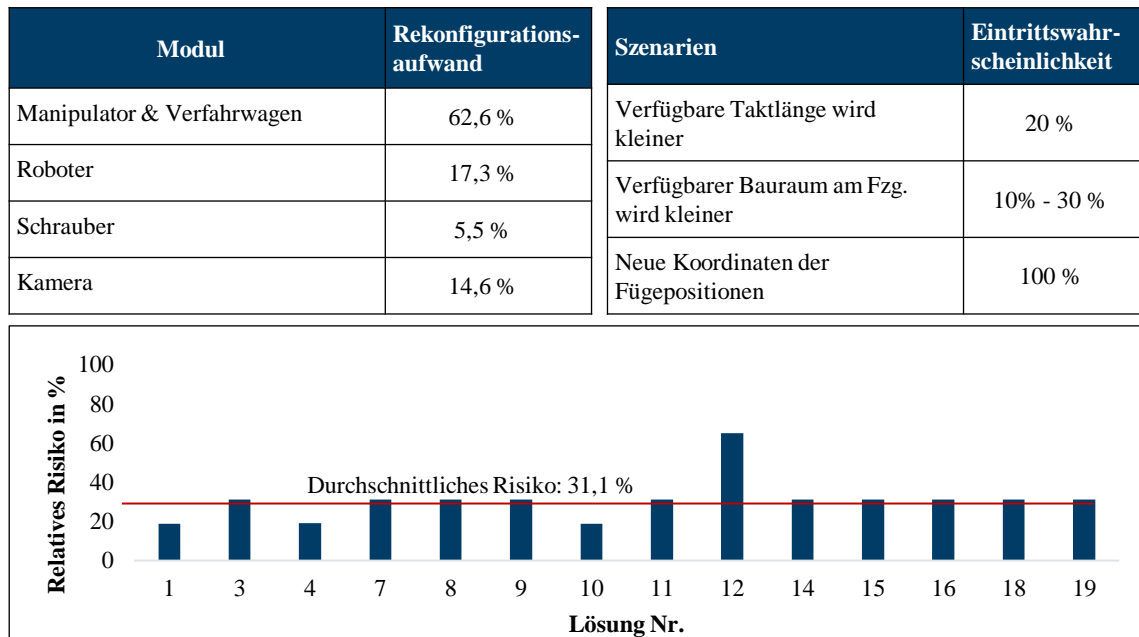


Abbildung 71: Risiko der Rekonfiguration des Montageassistenten

### 9.3.2 Wiederverwendbarkeit der Montagestationen

Neben dem Risiko der Rekonfiguration sind weitere Kriterien wie z. B. das Kosten-Nutzen-Verhältnis, der Mensch-Maschine Faktor sowie die Effektivität des Moduls und des Montagelinienabschnittes zu analysieren. Die Häufigkeit der Wiederverwendung wurde bereits mit Kapitel 9.2.2 herausgestellt. Folgend wird in Kürze auf die übrigen Kriterien eingegangen.

#### Kosten-Nutzen-Verhältnis

Zur weiteren Analyse der Wiederverwendbarkeit wurden abhängig der Wiederverwendungshäufigkeit der Module aus Kapitel 9.2 die Kosteneffekte der Wiederverwendung von Artefakten sowie der Skaleneffekte ermittelt. Ebenso wurden die Kosteneffekte ausgehend der Mehrfachverwendung berücksichtigt. Das normierte Ergebnis ist in der Abbildung 72 dargestellt. Die Einsparungen der Mehrfachverwendung stützen sich vor allem auf die gemeinsame Nutzung von Anlagensteuerungen sowie kleinerer Einsparungen aus dem Entfall von Scannern. Für größere Anlagen werden zusätzlich Einsparungen aus der gemeinsamen Nutzung von Bereitstellungssystemen erwartet. Mit ca. 22 % besitzt die Wiederverwendung von Artefakten wie z. B. Konstruktionen, Dokumentationen oder auch Erfahrungen aus Tests und Inbetriebnahmen den größten Einfluss. Annahme hierbei stellt jedoch nicht die vollständige sondern viel mehr eine anteilige Einsparung von Konstruktionen, Dokumentationen und anderer Artefakte dar. Bei Modulen wie z. B. einem Roboter oder Werkzeug handelt es sich häufig um Kaufteile. Durch die Wiederverwendung dieser können kleinere Einsparungen durch Skaleneffekte gewonnen werden.

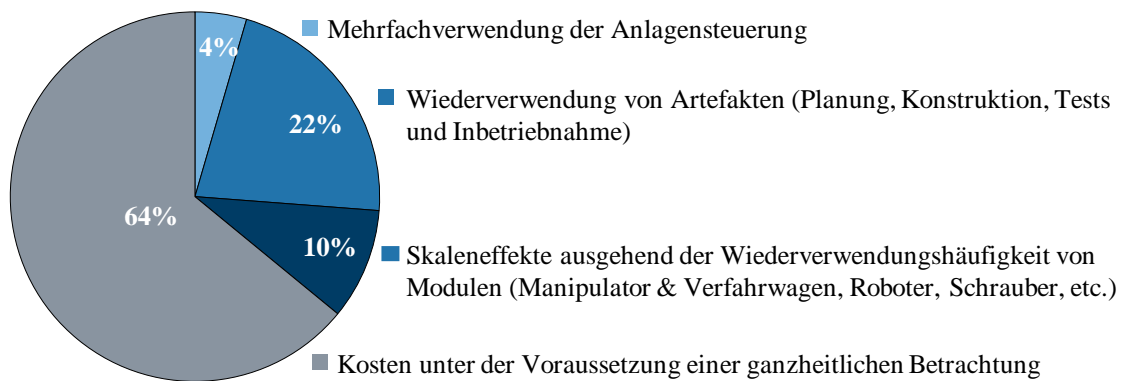


Abbildung 72: Kosteneffekte ausgehend der fähigkeitsbasierten Planung

### Effektivität des Moduls und des Montagelinienabschnittes

Die einzelnen Anlagenkonzepte des Montageassistenten sind in Versuchen zu erproben. Erst ausgehend dieser sowie der späteren Integration und Nutzung der Montageassistenten in der Montagelinie sind fundierte Aussagen bzgl. der Effektivität des Montageassistenten sowie der Effektivität des Montagelinienabschnittes möglich. Allgemein wird die Forderung einer Effektivität von 98 % gestellt, welche zunächst angenommen wird und zu überprüfen ist.

Bei der Effektivität des Montagelinienabschnittes besteht zudem die Erwartung, dass diese höher ist als bei anderen Anlagenkonzepten wie z. B. eines stationären Roboters innerhalb eines Schutzzauns. Denn im Falle einer Störung kann der Montageassistent von dem Mitarbeiter ohne größeren Aufwand aus dem Arbeitsbereich geschoben werden. Ebenso können bei den betrachteten Schraubprozessen ohne komplexe Hilfswerkzeuge Nacharbeiten stattfinden.

### Mensch-Maschine Faktor

Die Bewertung des Mensch-Maschine Faktors ist dem Anhang 13 zu entnehmen. Hinsichtlich der Datenqualität stellt der Montageassistent ein wiederverwendbares Modul dar. Für eine höhere Wiederverwendbarkeit des Montageassistenten sind vor allem weitere Informationen aus Tests und Betrieb erforderlich. Für viele der generierten Anlagenkonzepte sind die Fähigkeiten in Tests zu überprüfen (siehe Kapitel 9.2.3). Ebenso sind für die Anlagen- und Prozessüberwachung weitere Maßnahmen mit Blick auf ein Condition Monitoring zu identifizieren und umzusetzen.

### Wiederverwendbarkeit des Montageassistenten

In der Abbildung 73 sind die Ausprägungen der Kriterien zur Bewertung der Wiederverwendbarkeit des Montageassistenten zusammengefasst. Die Skalen spiegeln einen ersten Stand wieder und sind mit zunehmenden Bewertungen zu evaluieren bzw. anzupassen. Allgemein wird die Wiederverwendbarkeit des Montageassistenten jedoch als hoch eingestuft. In weiteren Planungen sind die Wiederverwendungen des Montageassistenten für weitere Montagelinien zu analysieren. Ebenso sind die Wiederverwendungen der Funktionsgruppen

aus Kapitel 2.3.1 zu untersuchen. Nach der Analyse der Wiederverwendungen weiterer Anlagen bzw. Anlagenkonzepte sind diese dem Montageassistenten gegenüberzustellen. Nach diesem Vorgehen kann folgend eine systematische Bewertung und Auswahl von Modulen getroffen und die Basis für eine produkt-/ prozessorientierte Planung entwickelt werden (siehe Kapitel 8.2.5).

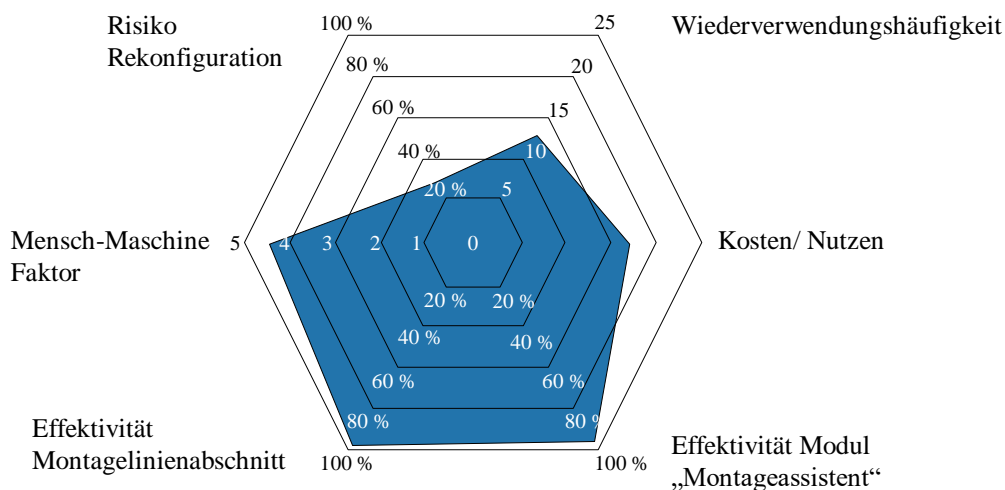


Abbildung 73: Wiederverwendbarkeit des Montageassistenten

### 9.3.3 Diskussion der Analyse der Wiederverwendbarkeit

Die Analyse der Kriterien für die Bewertung der Wiederverwendbarkeit hat gezeigt, dass allgemein eine Vielzahl an Daten und Informationen für die Bewertung erforderlich sind. So sind z. B. Informationen bzgl. zukünftiger Szenarien oder aus der Nutzungsphase für die Bewertung der Effektivität des Moduls oder des Montagelinienabschnittes erforderlich. Ohne eine Rückkopplung von Informationen aus der Nutzungsphase können Anlagenkonzepte nur schwierig hinsichtlich jedes Kriteriums bewertet werden. Die Bewertung der Wiederverwendbarkeit ist daher im Laufe der weiteren Entwicklung von Anlagenkonzepten stetig zu detaillieren, z. B. mit Hilfe erster Versuche der Anlagenkonzepte in Laborumgebungen.

Bei der Analyse des Risikos der Rekonfiguration hat sich gezeigt, dass eine Vielzahl an Risiken allgemeingültig für die Automobilendmontage sind. Insbesondere bei Schraubprozessen existiert eine Vielzahl von Standards. Im Hinblick auf weitere Fügeprozesse, mit einem geringeren Standardisierungsgrad, sind daher weitaus höhere Risiken zwischen den Szenarien zu erwarten. Vor allem bei der Handhabung von Bauteilen können z. B. unterschiedliche Geometrien schnell zu einer Anpassung des Anlagenkonzepts führen. Des Weiteren ist zu beachten, dass es sich bei der Bewertung der Szenarien sowie der Gewichtung der Rekonfigurationsaufwände mit Hilfe von Domain Experten weiterhin zum Teil um subjektive Einschätzungen handelt. Für eine höhere Objektivität sind weitere Abfragen von Experten durchzuführen. Rekonfigurationsaufwände könnten alternativ ausgehend von Erfahrungen der Montage/ Demontage der Anlage verifiziert werden.

Die Analyse der Kosteneffekte stellt innerhalb dieser Arbeit eine erste Annahme dar. Mit Hilfe von gebündelten Vergaben und Angeboten von Modulen sowie der Umsetzung der Anlagenkonzepte sind die Werte zu evaluieren. Abhängig der Marktsituation und Verfügbarkeit von Modulen können hierbei wiederholte Überprüfungen sinnvoll sein. Ebenso stellt eine detaillierte Analyse der wiederverwendbaren immateriellen Artefakte einen hohen Planungsaufwand dar, weshalb im Rahmen der Anwendung der Methode hierfür nur eine grobe Abschätzung erfolgte. Zusammengefasst stellt die Planungsmethode jedoch ein systematisches Vorgehen zur Reduzierung der Kosten und Entwicklung wirtschaftlicher Anlagen dar.

Für eine qualitative Einstufung der Wiederverwendbarkeit von Modulen in eine geringe, mittlere und hohe Wiederverwendbarkeit sind weitere Anwendungen der Methode für sowohl neue Anlagenkonzepte als auch weitere Fügeprozesse durchzuführen. Da es sich bei der Bewertung der Wiederverwendbarkeit um eine theoretische Betrachtung handelt, sind langfristig die Umsetzungswahrscheinlichkeiten von Anlagenkonzepten zu hinterfragen und innerhalb der Bewertung und Auswahl von Anlagenkonzepten einzubeziehen. Eine geringere Anzahl an Wiederverwendungen würde z. B. ebenso zu einer geringeren Wiederverwendbarkeit führen und die Auswahl von Modulen beeinflussen.

### **9.4 Modulorientierte Qualifizierung**

Ausgehend der Analyse der Wiederverwendbarkeit der Module kann folgend eine Auswahl getroffen werden, welche Module im Weiteren für eine Qualifizierung geeignet sind. Die Qualifizierung eines jeden Moduls im Einzelnen würde jedoch einen hohen Aufwand bzgl. Zeit und Kosten mit sich führen, wodurch die Effekte der Wiederverwendung nicht zum Tragen kommen würden. Daher sollen ähnliche Module und deren Qualifizierungsumfänge gebündelt und einmalig erprobt werden (siehe Kapitel 6.1). Die modulorientierte Qualifizierung ist nicht Teil der Methode dieser Arbeit, soll jedoch am Beispiel des Montageassistenten exemplarisch durchgeführt werden. Dazu sind zuvor ähnliche Qualifizierungsumfänge der Montageassistenten sowie die Kausalitäten dieser zueinander herauszustellen.

Für die Qualifizierung der einzelnen Module ist die Methodik des Scaled Agile Framework, kurz SAFe, verwendet worden (siehe (SCHIEFER 2022)). Über ein Program Increment Planning (PI Planning) sind die Qualifizierungsschritte der Module in mehrere Iterationen aufgeteilt worden. Im Rahmen des PI Planning wurden die Module der einzelnen Anlagenkonzepte sowie deren Kausalitäten aus Kapitel 9.2 untersucht und in einen sinnvollen Zusammenhang geordnet. Die einzelnen Iterationen sind mit Hilfe eines sog. Program Board in der Tabelle 10 dargestellt. Zunächst erfolgt hierbei eine Qualifizierung auf der Komponentenebene (Iteration 1,2, 3, 4 & 5). Mit erfolgreicher Qualifizierung dieser wird anschließend das Zusammenspiel der Funktionsgruppe des Montageassistenten (Iteration 5 & 7) erprobt.

Wie in dem Anlagenkonzept für die Bündelung Massemuttern und Airbagsteuergerät (siehe Kapitel 9.2.1) ist der Schrauber hinsichtlich seiner Fähigkeit für den Ausgleich von Positionsdifferenzen zu untersuchen. Ausgehend dessen sowie der Positioniergenauigkeit des Manipulators ist im Weiteren der Schrauber bzw. Schraubprozess in Kombination mit dem Kamerasystem zu erproben. Hierbei ist, im Falle eines nicht ausreichenden Toleranzausgleichs des Schraubers, der Schraubprozess mit Hilfe eines Kamerasystems auszuführen. Die Fügeposition selbst ist hierbei durch das Kamerasystem zu detektieren. Nach der Erprobung der einzelnen Module ist das Anlagenkonzept für den Gesamtprozess zu erproben. Hierbei sind gebündelt alle ähnlichen Prozesse wie z. B. die des Innenraums, des Vorderwagens oder Hinterwagens zusammen zu betrachten.

Tabelle 10:Ausschnitt - Program Board Montageassistent

| Module                  | Iteration 1                        | Iteration 2            | Iteration 3           | Iteration 4          | Iteration 5                          | Iteration 6                          | Iteration 7                            |
|-------------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|
| Schrauber               | Ausgleich Positionsdifferenzen     |                        |                       |                      | Erprobung Montageassistent Innenraum |                                      | Erprobung Montageassistent Vorderwagen |
| Kamerasystem            |                                    | Kontrolle Fügeposition | Kontrolle Lochdeckung | Kontrolle Bauzustand |                                      |                                      |  |
| Kraft-Momenten-Sensorik | Ausgleich Positionsdifferenzen     |                        | Nachführen Werkzeug   |                      |                                      |                                      |  |
| Manipulator             | Bewegen Fahrzeugposition Innenraum |                        |                       |                      |                                      | Bewegen Fahrzeugposition Vorderwagen |  |
| Roboter                 |                                    |                        |                       |                      |                                      |                                      |  |

Bei der Erprobung der einzelnen Module sind jeweils alle notwendigen Fähigkeiten zu berücksichtigen. Ein Schrauber ist z. B. einmalig für alle zukünftigen, relevanten Arten von Schraubprozessen zu qualifizieren. Ebenso ist das Kamerasystem für die unterschiedlichen Farben, Materialien, Konturen und Kameraeinstellungen wie z. B. Filter, Auflösung oder Distanz zum Prüfmerkmal zu erproben.

Bezogen auf die Qualifizierung von Modulen stellt die Methode dieser Arbeit eine systematische Unterstützung dar. Durch die Modellierung von PPR können für sich wiederholende Anforderungen gleiche Module mit gleichen Fähigkeiten identifiziert und entwickelt werden. Hierdurch ist eine fähigkeitsorientierte Qualifizierung und Standardisierung von Modulen möglich.

### 9.5 Zusammenfassung offener Handlungsfelder

In den Kapiteln 9.2.3 und 9.3.3 wurde bereits auf einige der offenen Punkte für zukünftige Arbeiten eingegangen. Das Thema Toleranzen und Toleranzkettensimulationen ist z. B. für eine Steigerung der Planungsqualität weiter auszuarbeiten. Ebenso sind für die Einstufung der Wiederverwendbarkeit von Modulen weitere Anwendungen und Bewertungen analog



dieser Arbeit vorzunehmen. Neben diesen soll folgend auf weitere offene Handlungsfelder eingegangen werden.

### **Übertragbarkeit der Methode auf weitere Anwendungsfälle**

Die fähigkeitsbasierte Planung ist innerhalb dieser Arbeit im Detail für Schraubprozesse entwickelt und angewendet worden. Neben Schraubprozessen existieren in der Automobilendmontage jedoch eine Vielzahl weiterer Prozesse, wie z. B. Reinigungs-, Anroll-, Clips- oder Klebprozesse (siehe (Lotter und Wiendahl 2012, VDI 2860, DIN 8593-0)). Für die Automatisierung dieser ist ausgehend der ersten Anwendung der Arbeit die fähigkeitsbasierte Planung zu empfehlen. Die Übertragbarkeit der Methode ist daher in folgenden Arbeiten für weitere Prozesse zu überprüfen. Neben der Übertragbarkeit auf weitere Prozesse ist ebenso zu hinterfragen, ob sich die Methode bzw. Teile der Methode dieser Arbeit auch für ein Produktionsumfeld neben der Automobilendmontage eignen.

### **Qualifizierung neuer Module**

Wie in Kapitel 9.4 eingeleitet, sind zur weiteren Detaillierung und Validierung von Fähigkeiten die einzelnen Komponenten bzw. Module mit ihren Fähigkeiten im Detail zu untersuchen. Im Hinblick auf technologisch neue und komplexe Module wie z. B. dem „Bin Picking“ (siehe (Buchholz 2016)) oder anderer kameragestützter Technologien sind hierfür versuchstechnische Bewertungen, z. B. im Rahmen einer modulorientierten Qualifizierung, einen hohen Stellenwert zuzukommen und als Grundlage folgender Modellierungen zu verwenden. Die Methodik der modulorientierten Qualifizierung ist daher in weiteren Arbeiten weiter im Detail herauszuarbeiten. Arbeiten wie z. B. von (Sarna et al. 2021) zeigen hierfür bereits erste Ansätze.

### **Prozessüberwachung & Datenauswertung aus der Nutzung**

Allgemein sind für die fähigkeitsbasierte Planung sowie der Analyse der Wiederverwendbarkeit eine Reihe von Daten und Informationen aus Versuchen und der Nutzung eines Moduls bzw. einer Produktionsanlage erforderlich. Vor allem für die Analyse der Wiederverwendbarkeit kleinerer Module sind Störungen, Anlagenausfälle und Nacharbeiten aus der Produktion mit diesen Modulen in Abhängigkeit zu setzen. Hierfür sind z. B. innerhalb der modulorientierten Qualifizierung oder während der Nutzung der Anlage die Kausalitäten und Verhalten der Module weiter im Detail zu untersuchen. In (Biffel et al. 2021a) sind hierfür bereits erste Ansätze zu sehen, in denen u. a. mögliche Fehler, Effekte und Ursachen mit den einzelnen Modulen in Abhängigkeit gesetzt werden (siehe Abbildung 74). Wissensmodelle wie in (Biffel et al. 2021b, Biffel et al. 2021a) und (Meixner et al. 2021) zeigen zudem die Kausalitäten von einzelnen Assets auf. Diese könnten zukünftig ebenso dafür genutzt werden, den Rekonfigurationsaufwand von Anlagenkonzepten noch weiter im Detail zu bewerten. Außerdem besteht mit Hilfe des Modells aus Abbildung 74 die Möglichkeit, weitere Konsequenzen der Rekonfiguration von Modulen auf andere Module, der Struktur oder Prozesse nachzuverfolgen.

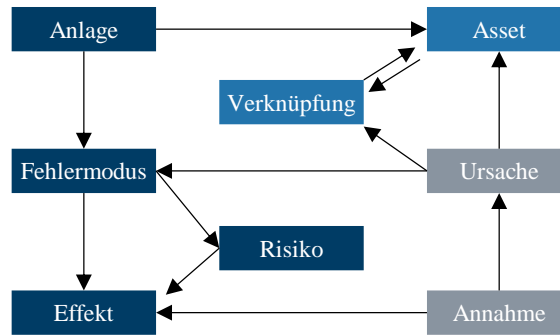


Abbildung 74: CPS Risk Assessment Meta-Model (in Anlehnung an Biffel et al. 2021a)

Daten und Informationen ausgehend realer Anlagen sind für die Planung zu erfassen und zu berücksichtigen. Dies fordert verstärkt den Einsatz von cyber-physischen Systemen (CPS), welche die physische Welt bzw. die reale Produktionsanlage mit der Cyber-Welt bzw. dem digitalen Abbild verknüpfen (Neugebauer 2018). Ein großes Thema bei CPS ist die Datenerfassung und -auswertung, um Informationen über das Verhalten der physischen Produktionsanlage zugänglich zu machen. Ausgehend dessen sowie unterstützenden Softwaresystemen ist im Umkehrschluss eine Regelung der physischen Produktionsanlage möglich (Thiede, Juraschek und Herrmann 2016). Zusammengefasst ist herauszuarbeiten, wie eine ganzheitliche Datenerfassung und –auswertung für das Produktionsumfeld der Automobilendmontage durchgeführt werden kann.

### Verwaltung von Daten & Informationen

Einhergehend mit der Datenerfassung und –auswertung geht auch die Verwaltung der Daten. Die Daten und Informationen aus den einzelnen Phasen der fähigkeitsbasierten Planung (siehe Kapitel 6.1) sowie Daten und Informationen aus der Nutzung sind miteinander zu vernetzen. Hierfür bietet sich z. B. die Verwaltungsschale an (siehe Kapitel 4.3.3). Für eine detaillierte Auslegung einer Verwaltungsschale für die Automobilendmontage ist es zielführend, ganzheitlich alle potentiellen Lebensphasen sowie Anwendungen der Daten und Informationen zu berücksichtigen. In weiteren Arbeiten ist somit herauszuarbeiten, wie eine Verwaltungsschale speziell für das Umfeld der Automobilendmontage zu gestalten ist.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde eine fähigkeitsbasierte Planungsmethode zur Analyse der Wiederverwendbarkeit entwickelt, um wiederverwendbare Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien zu identifizieren und deren Wiederverwendungen systematisch zu steigern. Allgemein ist die Arbeit der angewandten Wissenschaft zuzuordnen, wobei ausgehend des aktuellen Stands der Wissenschaft und Technik ein Handlungsbedarf herausgestellt wurde.

Zunächst ist hierfür eine Charakterisierung der Automobilendmontage vorgenommen worden. Hierbei wurden verschiedene Arten von Anlagenkonzepten und Synchronisierungslösungen vorgestellt. Da im Rahmen der Arbeit der Fokus vor allem auf Schraubprozesse sowie auf Anlagenkonzepte für den Fließbetrieb gelegt wurde, hat sich die Art der Synchronisierung als maßgebend für die Gestalt einer Anlage herausgestellt (siehe Kapitel 2).

In den Kapiteln 3 und 4 ist folgend eine Einführung in die zwei Themenschwerpunkte dieser Arbeit, der Wiederverwendung im Engineering sowie der fähigkeitsbasierten Planung von Anlagen, gegeben worden. Neben einer Definition der Begriffe Wiederverwendung und Wiederverwendbarkeit wurde vor allem auf die Mehrfachverwendung von Modulen sowie auf das Risiko der Rekonfiguration von Modulen für zukünftige Szenarien eingegangen. Die Mehrfachverwendung ist im Rahmen dieser Arbeit als die zeitgleiche Verwendung einer Anlage bzw. eines Moduls für verschiedene Anlagen bzw. Prozesse definiert worden, z. B. durch die Bündelung mehrerer Prozesse in einer Anlage. Allgemein zielt die Mehrfachverwendung damit auf die Steigerung des Nutzungsgrades von Anlagen. Im Themenschwerpunkt der fähigkeitsbasierten Planung hingegen lag der Fokus vor allem auf der Modellierung von Daten, Informationen und Wissen sowie auf dem Ansatz des PPRS-Modells nach (Pfrommer, Schleipen und Beyerer 2013).

Die Untersuchung des Forschungsbedarfs in Kapitel 5 hat gezeigt, dass vor allem in der Modellierung von PPRS bezogen auf das Produktionsumfeld der Automobilendmontage und in der fähigkeitsbasierten Planung unter Berücksichtigung der Mehrfachverwendung von Anlagen und Anlagenkomponenten ein offener Handlungsbedarf besteht. Bezogen auf die Analyse der Wiederverwendbarkeit hat sich die Bewertung des Risikos der Rekonfiguration von Anlagenkonzepten als offener Handlungsbedarf herausgestellt. Denn aufgrund von Störgrößen wie z. B. neue oder zusätzliche Fahrzeuge auf einer Montagelinie ist die Eignung von Anlagen stetig zu überprüfen (siehe Kapitel 5). Insgesamt konnten elf offene Forschungsfragen für die fähigkeitsbasierte Planung und Analyse der Wiederverwendbarkeit identifiziert werden.

Aufbauend auf dem Stand der Wissenschaft und Technik ist in Kapitel 6 ein zweistufiges Gesamtkonzept bestehend aus einer fähigkeitsbasierten Planung von Wiederverwendungen sowie einer darauf aufbauenden Analyse der Wiederverwendbarkeit von Anlagen und An-

lagenkomponenten erarbeitet worden. Die fähigkeitsbasierte Planung unterteilt sich im Detail weiter in die Modellierung von PPRS, fähigkeitsbasierte Konfiguration von Anlagenkonzepten sowie einer anschließenden Entwicklung eines Integrationskonzepts für die Anlagen in der Montagelinie. Zudem erfolgt eine Einordnung ins Engineering nach der (VDI/ VDE 3695). Bei der fähigkeitsbasierten Planung handelt es sich im Allgemeinen um eine Grobplanung von Anlagen sowie einer ersten groben Verortung von Anlagen in dem Layout der Montagelinie. Die Anwendung der fähigkeitsbasierten Planung hat hierbei gezeigt, dass eine feste Eingrenzung der Art des Anlagenkonzepts zielführend und dadurch eine gezielte und einfache Planung von Wiederverwendungen des jeweiligen Anlagenkonzepts möglich ist.

Für die Modellierung von PPRS existieren bereits eine Vielzahl von Ansätzen. Im Rahmen der Arbeit hat sich jedoch die Frage gestellt, wie eine Modellierung speziell für den Anwendungsfall der Automobilendmontage aussieht und wie eine Varianz von Produkt und Prozess berücksichtigt werden kann. In Kapitel 8.1 ist hierzu ein Modell aus den „Best Practice“ Ansätzen des Stands der Wissenschaft für das Produktionsumfeld der Automobilendmontage abgeleitet worden. Fokus lag besonders auf der Modellierung der Varianz, welche in dieser Arbeit durch die Beschreibung eines Anforderungskorridors von Produkt und Prozess gelöst wurde.

Auf der Grundlage des PPRS-Modells ist folgend eine Bündelung von ähnlichen Schraubprozessen sowie eine Konfiguration von Anlagenkonzepten für Gruppen ähnlicher Prozesse durchgeführt worden. Handlungsbedarf lag hierbei vor allem auf der Bündelung von mehreren Prozessen in einer Ressource sowie auf dem Zuordnung- und Optimierungsvorgehen. Für die Bündelung wurden dazu in Kapitel 8.2.2 und 8.2.3 Ähnlichkeiten identifiziert und ein Bündelungsvorgehen erarbeitet, bei dem einer Anlage iterativ ein neuer Prozess zugeordnet wird und die Auswirkungen dieser Zuordnung untersucht und bewertet werden. Abhängig des Bündelungsvorgehens wird die Konfiguration von Anlagenkonzepten jeweils für die neue Gruppe von Prozessen durchgeführt. Für die Zuordnung und Optimierung ist dazu ein heuristisches Verfahren entwickelt worden, welches sich an dem Prinzip der Mutation sowie dem Tabu Search Verfahren (siehe (Domschke et al. 2015)) anlehnt und versucht die kosteneffizientesten Anlagen zu generieren (siehe Kapitel 8.2.4). Die Konfiguration von Anlagenkonzepten basiert zusammengefasst auf einem deterministischen Vorgehen, welches über die Bündelung einem Anlagenkonzept iterativ einen Schraubprozess hinzufügt. Dieses Vorgehen adressiert vor allem den Bedarf kosteneffizienter Anlagen mit einem hohen Nutzungsgrad (siehe Kapitel 1.1).

Abschließend des Themenkomplexes der fähigkeitsbasierten Planung hat sich ein Forschungsbedarf bzgl. der Mehrfachverwendung von Modulen innerhalb der Automobilendmontage ergeben. Hierfür ist im letzten Schritt der fähigkeitsbasierten Planung, der Entwick-

lung eines Integrationskonzepts, ein Vorgehen zur örtlichen Bündelung von Anlagenkonzepten im Layout erarbeitet worden (siehe Kapitel 8.3). Dieser Schritt dient innerhalb der Methode vor allem der zusätzlichen Optimierung des Nutzungsgrades von Ressourcen sowie der Untersuchung der Realisierbarkeit der konfigurierten Anlagenkonzepte.

Auf Basis der fähigkeitsbasierten Planung von Wiederverwendungen erfolgt im zweiten Schritt des Gesamtkonzepts der Methode die Analyse der Wiederverwendbarkeit. Hierbei hat sich vor allem die Frage gestellt, wie die Effektivität und Effizienz der Wiederverwendung von Modulen analysiert und das Risiko der Rekonfiguration von Modulen für neue Situationen des Produktionsumfeldes bewertet werden kann. Für ersteres konnten in Kapitel 7.1 sechs Kriterien abgeleitet werden, nach dem eine objektive und ganzheitliche Bewertung der Effektivität und Effizienz einer Wiederverwendung innerhalb der Automobilendmontage möglich ist. Eines dieser Kriterien stellt das Risiko der Rekonfiguration dar. In Kapitel 7.2 ist zur Bewertung dessen ein Vorgehen erarbeitet worden, welches sich auf einen Analytischen-Hierarchie-Prozess sowie auf Expertenwissen für die Einschätzungen zukünftiger Szenarien stützt.

Die erste Anwendung der fähigkeitsbasierten Planung und Analyse der Wiederverwendbarkeit (siehe Kapitel 9) hat gezeigt, dass die Methode sowohl für die Identifikation wiederverwendbarer Anlagen, Anlagenkomponenten und Technologien geeignet ist als auch ein systematisches Vorgehen zur Planung effizienter Anlagenkonzepte darstellt. Das in der Anwendung betrachtete Anlagenkonzept konnte im Rahmen der fähigkeitsbasierten Planung insgesamt dreizehnmal wiederverwendet werden, womit gleichzeitig die Eignung der Lösung für einen neuen Anlagenbaukasten nachgewiesen werden konnte. Die Anwendung der Methode hat zudem herausgestellt, dass die Bündelung von Prozessen in einer Anlage sowie die Bündelung von Modulen innerhalb der Montagelinie den Nutzungsgrad von Anlagen zielgerichtet optimieren. Für weitere Planungen, auch abseits der fähigkeitsbasierten Planung, bietet diese Arbeit somit ein effizientes Vorgehen zur Überprüfung der Eignung von Modulen für zukünftige Situationen des Produktionsumfeldes, systematisches wiederverwenden von Modulen sowie zur Verbesserung des Nutzungsgrades bzw. der Auslastung von Anlagenkonzepten. Jedoch hat sich ebenso gezeigt, dass die Methode und die konfigurierten Anlagenkonzepte stark von dem Expertenwissen und den vorher definierten Regeln abhängig sind. Ein zentrales Thema stellen hierbei Fahrzeug- und Produkttoleranzen dar. Mit Hilfe von Versuchen ist im Detail zu untersuchen, wie Toleranzen in Abhängigkeit von Schrauber und Schraubengeometrie ausgeglichen werden können. Modellierungen und Regeln sind somit fortlaufend über Versuche zu überprüfen und zu ergänzen. Im Hinblick auf die Analyse und Bewertung der Wiederverwendbarkeit hat die Anwendung gezeigt, dass allgemein eine Vielzahl von Daten und Informationen aus der Nutzungsphase der Anlagen erforderlich sind. Ohne die Rückkopplung von Informationen wie z. B. der Technischen Verfügbarkeit ist eine ganzheitliche Bewertung der Wiederverwendbarkeit nicht möglich.

Für zukünftige Arbeiten legen sich hinsichtlich der fähigkeitsbasierten Planungsmethode dieser Arbeit verschiedene Handlungsfelder dar. Die Methode dieser Arbeit hat ihre Vorteile vor allem in der systematischen Steigerung der Wiederverwendung von Modulen sowie der effizienten Planung von Anlagenkonzepten, insbesondere durch die Bündelung von Prozessen und Modulen, dargelegt. Zur breiten Nutzung der Methode ist die Übertragbarkeit auf weitere Prozesse, neben Schraubprozessen, zu überprüfen. Ebenso ist in dem Zuge die Flexibilität der Methode sowohl für neue Montagestrukturen der Automobilendmontage als auch weiteren Produktionsbranchen neben der Automobilendmontage zu hinterfragen. Neben einer breiteren Nutzung der Methode ist die Methode selbst im Detail weiter auszuarbeiten. Es ist zu klären, wie Produkttoleranzen und Kausalitäten zwischen Produkt, Prozess und Ressource zum Ausgleich von Toleranzen optimal berücksichtigt werden können. Ebenso sind Modellierungen sowie Regeln für die fähigkeitsbasierte Konfiguration stetig zu überprüfen, z. B. über Versuche. Das Thema modulatorientierte Qualifizierung (siehe Kapitel 9.4) stellt für die fähigkeitsbasierte Planung eines der elementaren Handlungsfelder dar (siehe Kapitel 9.5). Für die Modellierung der Fähigkeiten neuer, komplexer Technologien wie z. B. dem Bin Picking sind diese in vorherigen Versuchen im Detail zu überprüfen (siehe (Sarna et al. 2021)). Hierfür ist zu klären, wie die Fähigkeiten von Modulen zielgerichtet überprüft und getestet werden können.

Für die fähigkeitsbasierte Planung als auch für die Analyse der Wiederverwendbarkeit ist die Rückkopplung von Daten und Informationen aus der Nutzungsphase erforderlich. Kausalitäten zwischen Anlagenkomponenten und Verhalten einzelner Komponenten sind im Detail zu untersuchen. Denn hierdurch sind Anlagenstörungen und Ausfälle der jeweilig verursachenden Komponente zuzuordnen. Dies adressiert zugleich die Prozessüberwachung und Datenauswertung von Anlagen (siehe Kapitel 9.5). Die Daten und Informationen sind folgend sowohl für die Modellierung von PPRS und der Definition von Regeln für die Konfiguration der Anlagenkonzepte als auch für die Analyse der Wiederverwendbarkeit zu verwenden. Mit der Forderung nach Daten und Informationen aus der Nutzungsphase für die Planung der Anlagen stellt sich des Weiteren die Frage nach der Verwaltung dieser. Einen ersten Ansatz hierfür zeigt die Verwaltungsschale (siehe Kapitel 4.3.3), jedoch ist speziell für den Anwendungsfall der Automobilendmontage zu untersuchen, wie diese im Detail zu gestalten ist.

## Literaturverzeichnis

Veröffentlichungen unter Mitwirkung des Autors, die im Zusammenhang mit diesem Dissertationsvorhaben entstanden sind:

(Herzog, Röpke und Lüder 2020b)

(Herzog, Röpke und Lüder 2020a)

(Herzog, Röpke und Lüder 2021)

(Biffel et al. 2021b)

(Meixner et al. 2021)

(Meixner et al. 2020)

Betreute Abschlussarbeiten, die im Zusammenhang mit diesem Dissertationsvorhaben entstanden sind und die vom Autor betreut worden sind:

(Wachs 2019)

(Skoruppa 2019)

(Musiol 2020)

(Nehm 2021)

(Riechers 2022)

- ABDI, M.R. (2005): Selection of a layout configuration for reconfigurable manufacturing systems using the AHP. In: Proceedings of the International Symposium on the Analytic Hierarchy Process for Multi-criteria Decision Making.
- ABELE, E. und G. REINHART (2011): Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Carl Hanser Fachbuchverlag.
- ABELE, E., F. ALBRECHT und L. FAATZ (2012): Wandlungsfähigkeit mit Materialflusssimulation bewerten. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 107 (11), S. 831–835.
- ABELE, E., T. LIEBECK und A. WÖRN (2006): Measuring Flexibility in Investment Decisions for Manufacturing Systems. CIRP annals, 55 (1), S. 433-436.
- AHMAD, M., B. AHMAD, R. HARRISON, B.R. FERRER und J.L.M. LASTRA (2017): Ensuring the consistency between assembly process planning and machine control software. In: 2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), IEEE, S. 1077-1083.
- AHMAD, M., B. AHMAD, R. HARRISON, B.R. FERRER, J.L.M. LASTRA, J. MEREDITH und A. BINDEL (2015): A knowledge-based approach for the selection of assembly equipment based on fuel cell component characteristics. In: IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE.
- AISENBREY, S., C. KÜBER und P. FOITH-FÖRSTER (2015): Planungsmethodik in der Automobilendmontage. Identifizierung von Vor- bzw. Hauptmontageumfängen. Verfügbar unter: <https://shop.gito.de/media/products/Leseprobe5124.pdf>, [Zugriff am: 31.20.2022].
- ALFEN, H.W., A. RIEMANN, K. LEIDEL, D. DAUBE, A. FRANK-JUNGBECKER, W. GLEIBNER und M. WOLFRAM (2010): Lebenszyklusorientiertes Risikomanagement für PPP-Projekte im öffentlichen Hochbau. Abschlussarbeit zum Forschungsprojekt. Weimar: Verlag der Bauhaus-Universität.
- ALTENKRÜGER, D. und W. BÜTTNER (1992): Wissensbasierte Systeme. Architektur, Entwicklung, Echtzeitanwendungen - Eine praxisgerechte Einführung. Wiesbaden: Vieweg.
- ASIM (1997): Leitfaden für Simulationsbenutzer in Produktion und Logistik. In: ASIM Mitteilungen Heft Nr. 7a.
- BACKHAUS, J.C.S. (2016): Adaptierbares aufgabenorientiertes Programmiersystem für Montagesysteme. Dissertation. Herbert Utz Verlag.
- BACKHAUS, J.C.S. und G. REINHART (2015): Digital description of products, processes and resources for task-oriented programming of assembly systems. In: Journal of Intelligent Manufacturing, 28 (8), S. 1787-1800.
- BACKHAUS, K., B. ERICHSON, W. PLINKE und R. WEIBER (2015): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. 14. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- BARNITZKE, A. (2021): Airskin macht Kuka-Roboter zum Cobot. Verfügbar unter: <https://automationspraxis.industrie.de/news/airskin-macht-kuka-roboter-zum-cobot/>, [Zugriff am: 16. April 2022].



- BAUERNHANSL, T., M. FECHTER und T. DIETZ (2020): Entwicklung, Aufbau und Demonstration einer wandlungsfähigen (Fahrzeug-) Forschungsproduktion. Berlin, Heidelberg: Springer.
- BAUERNHANSL, T., M. ten HOMPEL und B. VOGEL-HEUSER (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer.
- BEBERSDORF, P. und A. HUCHZERMEIER (2021): Variabler Takt. Mit dem VarioTakt Varianz beherrschen bei grenzenloser Produktindividualisierung. Berlin, Heidelberg: Springer.
- BEIERLE, C. und G. KERN-ISHERNER (2019): Methoden wissensbasierter Systeme. Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen. 6. Auflage. Wiesbaden: Springer.
- BENDEL, O. (2021): Cyberphysische Systeme. Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/cyber-physische-systeme-54077/version-384624>, [Zugriff am: 13. November 2022].
- BIFFL, S., A. LÜDER und D. GERHARD (2017): Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems. Data Models and Software Solutions for Handling Complex Engineering Projects. Cham: Springer.
- BIFFL, S., A. LÜDER, K. MEIXNER, F. RINKER, M. ECKHART und D. WINKLER (2021a): Multi-view-Model Risk Assessment in Cyber-Physical Production Systems Engineering. In: Proceedings of the 9th International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development (MODELSWARD 2021), S. 163-170.
- BIFFL, S., K. MEIXNER, A. LÜDER, J. HERZOG, F. RINKER, A.K. BEHNERT und D. WINKLER (2021b): Industry 4.0 asset based requirements tracing in cyber-physical production system engineering. Wien: TU Wien.
- BLEY, H. und C. FRANKE (2000): Integration von Produkt- und Produktionsmodell mit Hilfe der Digitalen Fabrik. In: VDI-Berichte, S.181-197.
- BMWK (2022): Details of the Asset Administration Shell. Part 1 - The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0. Verfügbar unter: [https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details\\_of\\_the\\_Asset\\_Administration\\_Shell\\_Part1\\_V3.pdf?\\_\\_blob=publication-File&v=12](https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V3.pdf?__blob=publication-File&v=12), [Zugriff am: 31. Oktober 2022].
- BÖGEMANN, I. (2018): Produktlebenszyklen werden immer kürzer, Ihre Entwicklungszeiten auch? Verfügbar unter: <https://blog.mb-collaborations.com/de/produktlebenszyklen-kuerzer-entwicklungszeiten-geringer>, [Zugriff am: 17. Februar 2022].
- BOYSEN, N., M. FLIEDNER und A. SCHOLL (2007): A classification of assembly line balancing problems. In: European Journal of Operational Research, 183, S. 674-693.
- BRACHT, U., D. GECKLER und S. WENZEL (2018): Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin: Springer.
- BRÜHWILER, B. (1979): Risikomanagement. Zürich: In: Management-Zeitschrift Industrielle Organisation.
- BRÜHWILER, B. (2001): Unternehmensweites Risk Management als Frühwarnsystem: Methoden und Prozesse für die Bewältigung von Geschäftsrisiken in integrierten Managementsystemen. Bern: Haupt.

- BRÜNGER, C. (2011): Nutzenkonsistente Risikopriorisierung. Die Risk-Map im Kontext rationaler Entscheidungen. Dissertation. Wiesbaden: Springer.
- BUCHHOLZ, D. (2016): Bin-Picking. New Approaches for a Classical Problem. Cham: Springer International Publishing, 44.
- BULLINGER, H.-J., D. AMMER, K. DUNGS, U. SEIDEL und B. WELLER (1986): Systematische Montageplanung. München: Hanser.
- CISEK, R., C. HABICHT und P. NEISE (2002): Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 97 (9), S. 441-445.
- CLAUS, V. (2006): Duden-Informatik A-Z: Fachlexikon für Studium, Ausbildung und Beruf. Dudenverlag.
- CLEVE, J. und U. LÄMMEL (2016): Data Mining. 2. Auflage. Berlin: de Gruyter.
- CUIPER, R. (2000): Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen. Dissertation. München: Herbert Utz Verlag.
- DIN 66241 (1979): Entscheidungstabelle - Beschreibungsmittel. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 8593-0 (2003): Fertigungsverfahren Fügen. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN ISO 31000 (2018): Risikomanagement - Leitlinien. Berlin: Beuth Verlag.
- DIRNDORFER, A. (1993): Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage. Berlin: Springer.
- DOERNER, K.F., M. GENDREAU, P. GREISTORFER, W. GUTJAHR, R.F. HARTL und M. REIMANN (2007): Metaheuristics. Progress in Complex Systems Optimization. New York: Springer, 39.
- DOMBROWSKI, U., T. BOTHE und H. TIEDEMANN (2001): Visionen für die digitale Fabrik. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 96 (3), S. 96-100.
- DOMSCHKE, W., A. DREXL, R. KLEIN und A. SCHOLL (2015): Einführung in Operations Research. 9., überarbeitete und verbesserte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- DRATH, R. (2010): Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML. Integration von CAEX, PLCopen XML und COLLADA. Berlin, Heidelberg: Springer.
- DRATH, R. (2021a): AutomationML. A Practical Guide. Berlin, Boston: de Gruyter Oldenbourg.
- DRATH, R. (2021b): AutomationML. The Industrial Cookbook. Berlin, Boston: de Gruyter Oldenbourg.
- EHRENSPIEL, K., A. KIEWERT, U. LINDEMANN und M. MÖRTL (2007): Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 6., überarbeitete und korrigierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- ELGER, J. und C. HAUBNER (2010): Entwicklungen in der Automatisierungstechnik. In: Internet der Dinge in der Intralogistik. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 23–27.
- ELMARAGHY, H.A. (2005): Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. In: International journal of flexible manufacturing systems, 17 (4), S. 261–276.

- EMOVE360° (2020): Dynamic Assembly Pack: ABB ergänzt letztes Puzzlestück zur Automatisierung der Endmontage. Verfügbar unter: <https://www.emove360.com/de/dynamic-assembly-pack-abb-ergaenzt-letztes-puzzlestueck-zur-automatisierung-der-endmontage/>, [Zugriff am: 9. November 2021].
- EVERSHEIM, W. (1989): Organisation in der Produktionstechnik Band 4. Fertigung und Montage. 2. Auflage. Berlin: Springer.
- FANUC (2019): Fanuc stellt ersten kollaborativen Leichtbauroboter vor. Verfügbar unter: <https://www.fanuc.eu/de/de/wer-wir-sind/news-and-events/eu-irex-12-2019>, [Zugriff am: 31. Oktober 2022].
- FELDHUSEN, J. und K.-H. GROTE (2013): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin: Springer.
- FELDMANN, K., V. SCHÖPPNER und G. SPUR (2014): Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren. 2., vollständig neu bearbeitete Auflage. München: Hanser.
- FERREIRA, P. und N. LOHSE (2012): Configuration model for evolvable assembly systems. In: 4th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems, S. 3.
- FERREIRA, P., N. LOHSE, M. RAZGON, P. LARIZZA und G. TRIGGIANI (2012): Skill based configuration methodology for evolvable mechatronic systems. In: IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, S. 4366-4371.
- FIAM (2019): Verschraubssysteme mit automatischer Schraubzuführung. Verfügbar unter: <https://www.fiamgroup.com/wp-content/uploads/2019/11/de-89.pdf>, [Zugriff am: 9. November 2021].
- FIEGE, S. (2006): Risikomanagement- und Überwachungssystem nach KonTraG. Prozess, Instrumente, Träger. Dissertation. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- FUCHSLOCHER, G. (2021): Volkswagen und Dürr automatisieren das Scheibenkleben. In: Automobil Produktion. Verfügbar unter: <https://www.automobil-produktion.de/technik-produktion/produktionstechnik/volkswagen-und-duerr-ermoeglichen-automatisiertes-scheibenkleben-101.html>, [Zugriff am: 4. Januar 2022].
- GAUSEMEIER, J., A. FINK und O. SCHLAKE (1998): Scenario management: An approach to develop future potentials. In: Technological Forecasting and Social Change, 59 (2), S. 111–130.
- GEPP, M., J. VOLLMAR und T. SCHAEFFLER (2014): Standartization Programs in the Industrial Plant Business: Best Practices and Lessons Learned. In: 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEE, S. 122–126.
- GÖTZ, M. (2006): Management - Umfrageergebnisse zur Digitalen Fabrik. In: VDI Z-Integrierte Produktion, 147 (11/12), S. 72–73.
- GÖTZE, U., K. HENSELMANN und B. MIKUS (2013): Risikomanagement. Berlin, Heidelberg: Springer.
- GUSTAVSSON, T. (2018): Practices for vertical and horizontal coordination in the Scaled Agile Framework. Lund, Schweden: In: ISD2018 Proceedings.
- GUTMANNSTHAL-KRIZANITS, H.P. (2013): Risikomanagement von Anlagenprojekten: Analyse, Gestaltung und Controlling aus Contractor-Sicht. Wiesbaden: Springer.

- HADY, L. und G. WOZNY (2012): Multikriterielle Aspekte der Modularisierung bei der Planung verfahrenstechnischer Anlagen. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 84 (5), S. 597–614.
- HALLER, M. (1999): Bewertung der Flexibilität automatisierter Materialflusssysteme der variantenreichen Grossserienproduktion. Dissertation. München: Herbert Utz Verlag.
- HAMELMANN, S. (1996): Systementwicklung zur Automatisierung der Arbeitsplanung. Dissertation. Hannover: VDI-Verlag.
- HAMMERSTINGL, V. und G. REINHART (2017): Fähigkeiten in der Montage. Technische Universität München (Hg.). Verfügbar unter: <http://mediatum.ub.tum.de/?id=1370174>, [Zugriff am: 24. Januar 2019].
- HEES, A.F. (2017): System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme. München: Herbert Utz Verlag, 331.
- HELL, K. (2018): Methoden der projektübergreifenden Wiederverwendung im Anlagenentwurf. Konzeptionierung und Realisierung in der Automobilindustrie. Dissertation. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität.
- HERRMANN, C. (2010): Ganzheitliches Life Cycle Management. Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen. Berlin: Springer.
- HERRMANN, C., G. REINHART, G. SCHUH, T. SPENGLER, T. VIETOR, B. DRESCHER, M. GÄDE, T. KLEIN, T. RICHTER, M. SCHÖNEMANN, B. SPIEGELBERGER und T. VOGELS (2015): Strategien, Methoden und Werkzeuge für die Entwicklung mechatronischer Produkte. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 110 (5), S. 251-255.
- HERZOG, J., H. RÖPKE und A. LÜDER (2020a): Allocation of PPRS for the plant planning in the final automotive assembly. In: 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, Vol. 1, S. 813-820.
- HERZOG, J., H. RÖPKE und A. LÜDER (2020b): Management der Produktvarianz in der Anlagenplanung der Automobilendmontage unter Nutzung der PPRS Modellierung. In: 21. VDI-Kongress Automation 2020.
- HERZOG, J., H. RÖPKE und A. LÜDER (2021): Analysis of the reusability of modules in the final automotive assembly. In: 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, S. 1-8.
- HESSE, S. und V. MALISA (2016): Taschenbuch Robotik, Montage, Handhabung. Mit 34 Tabellen. 2., neu bearbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag.
- HESSE, S. und V. MALISA (2020): Grundlagen der Handhabungstechnik. 5., neu bearbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag.
- HOANG, X.L. und A. FAY (2019): A capability model for the adaptation of manufacturing systems. In: 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, S. 1053-1060.
- HOANG, X.-L., C. HILDEBRANDT und A. FAY (2018): Product-oriented description of manufacturing resource skills. In: IFAC-PapersOnLine, 51 (11), S. 90-95.
- HOMPEL, M. ten und T. SCHMIDT (2010): Warehouse Management. Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.

- HOMPEL, M. ten, H. BÜCHTER und U. FRANZKE (2007): Identifikationssysteme und Automatisierung. Berlin, Heidelberg: Springer.
- HU, S.J., X. ZHU, H. WANG und Y. KOREN (2008): Product variety and manufacturing complexity in assembly systems and supply chains. In: CIRP annals, 57, S. 45-48.
- HUCKABY, J.O.D. und H.I. CHRISTENSEN (2012): A taxonomic framework for task modeling and knowledge transfer in manufacturing robotics. In: Workshops at the Twenty-Sith AAAI Conference on Artificial Intelligence.
- HUMBURGER, R. (1998): Konzeption eines Systems zur aufgabenorientierten Roboterprogrammierung. Dissertation, RWTH Aachen. Aachen: Shaker.
- HUTH, M. und F. ROMEIKE (2016): Risikomanagement in der Logistik. Konzepte - Instrumente - Anwendungsbeispiele. Wiesbaden: Springer.
- JÄRVENPÄÄ, E. (2012): Capability-based Adaption of Production Systems in a Changing Environment. Dissertation. Tampere: Tampere University of Technology.
- JAZDI, N., C. MAGA, P. GÖHNER, T. EHBEN, T. TETZNER und U. LÖWEN (2010): Mehr Systematik für den Anlagenbau und das industrielle Lösungsgeschäft - Gestiegene Effizienz durch Domain Engineering. Stuttgart: de Gruyter, Vol. 58, Nr. 9.
- JONAS, C. (2000): Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen. Dissertation. München: Herbert Utz Verlag, Forschungsberichte/ IWB, 145.
- KATHREIN, L., A. LÜDER, K. MEIXNER, D. WINKLER und S. BIFFL (2019a): Extending the Formal Process Description for Discrete Manufacturing. Technical Report CDL-SQI 2019-13. Wien: Technische Universität Wien.
- KATHREIN, L., K. MEIXNER, D. WINKLER, A. LÜDER und S. BIFFL (2019b): A meta-model for representing consistency as extension to the formal process description. In: 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, S. 1653-1656.
- KATHREIN, L., K. MEIXNER, D. WINKLER, A. LÜDER und S. BIFFL (2019c): Product-ion-Aware Modeling Approaches that Support Tracing Design Decisions. In: 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), IEEE, Vol. 1, S. 118–125.
- KEDDIS, N., G. KAINZ und A. ZOITL (2014): Capability-based planning and scheduling for adaptable manufacturing systems. In: Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), IEEE, S. 1-8.
- KEDDIS, N., G. KAINZ und A. ZOITL (2015): Product-driven generation of action sequences for adaptable manufacturing systems. In: IFAC-PapersOnLine, 48 (3), S. 1502–1508.
- KEMPE, T. (2004): Management wetterinduzierter Risiken in der Energiewirtschaft. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- KIEFER, J. (2007): Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau. Dissertation. Saarbrücken: Universität des Saarlandes.
- KLEIN, P.W. (2014): Methode zum Engineering von Produktionsanlagen durch Wiederverwendung von Modulen. Dissertation. Siegen: Universität Siegen.
- KLUGE, S. (2011): Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart.

- KO, J., S.J. HU und T. HUANG (2005): Reusability Assessment for Manufacturing Systems. In: CIRP Annals Manufacturing Technology, 54, S. 113–116.
- KÖHLEIN, A., B. BÖHM, J. ELGER, N. GEWALD, F. STALLINGER, R. NEUMANN und P. HEHENBERGER (2012): Potentials of mechatronic objects for improving mechatronic engineering: Results and insights form an online survey. In: IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012), IEEE, S. 1-8.
- KÖNIGS, H.-P. (2013): IT-Risikomanagement mit System. Praxisorientiertes Management von Informationssicherheits- und IT-Risiken. 4. Auflage. Wiesbaden: Springer.
- KONOLD, P. und H. REGER (2013): Praxis der Montagetechnik. Produktdesign, Planung, Systemgestaltung. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer.
- KOREN, Y., S.J. HU und T.W. WEBER (1988): Impact of manufacturing system configuration on performance. In: CIRP annals, 47 (1), S. 369-372.
- KOREN, Y., U. HEISEL, F. JOVANE, T. MORIWAKI, G. PRITSHOW, G. ULSOY und H. VAN BRUSSEL (1999): Reconfigurable manufacturing systems. In: CIRP annals, 48, S. 527–540.
- KOSOW, H., R. GAßNER, L. ERDMANN und B.-J. LUBER (2008): Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse. Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien. Berlin: IZT, 103.
- KRICKHAHN, R. und B. RADIG (1987): Die Wissensrepräsentationssprache OPS5. Sprachbeschreibung und Einführung in die regelorientierte Programmierung. Wiesbaden: Springer.
- KÜBER, C. (2017): Methode zur Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen in der variantenreichen Serienmontage. Dissertation. In: Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung.
- KUKA (2016): Gemeinsam schraubt es sich schneller: KUKA flexFELLOW unterstützt bei Triebsatzvormontage. Verfügbar unter: <https://www.kuka.com/de-de/unternehmen/presse/news/2016/10/vw-setzt-auf-mensch-roboter-kollaboration>, [Zugriff am: 17. April 2022].
- KUPSCH, P.U. (1973): Das Risiko im Entscheidungsprozeß. Wiesbaden: Springer.
- LANDERS, R.G., B.K. MIN und Y. KOREN (2001): Reconfigurable machine tools. In: CIRP annals, 50 (1), S. 269-274.
- LANGE, K.W. und F. WALL (2001): Risikomanagement nach dem KonTraG. Aufgaben und Chancen aus betriebswirtschaftlicher und juristischer Sicht. München: Vahlen.
- LAY, G. und E. SCHIRRMEISTER (2001): Sackgasse Hochautomatisierung? Praxis des Abbaus von Overengineering in der Produktion. Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.
- LOFERER, M. (2002): Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen. Dissertation. München: Herbert Utz Verlag.
- LÖFFLER, C. (2011): Systematik der strategischen Strukturplanung für eine wandlungsfähige und vernetzte Produktion der variantenreichen Serienfertigung. Dissertation. Heimsheim: Jost-Jetter.

- LORENZER, T. (2011): Wandelbarkeit in der Serienfertigung durch rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen. Dissertation. Zurich: ETH Zurich.
- LOTTER, B. und H.-P. WIENDAHL (2012): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- LÜDER, A., M. FOEHR, L. HUNDT, M. HOFFMANN, Y. LANGER und S. FRANK (2011): Aggregation of engineering processes regarding the mechatronic approach. In: IEEE 16th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2011), IEEE, S. 1-8.
- LUER, C. (2007): Assessing module reusability. In: First International Workshop on Assessment of Contemporary Modularization techniques (ACoM'07), IEEE, S. 7.
- MAGA, C., N. JAZDI und P. GÖHNER (2011): Reusable models in industrial automation: experiences in defining appropriate levels of granularity. In: IFAC Proceedings, 44 (1), S. 9145-9150.
- MAGA, C.R. (2013): Adaptierbares Wiederverwendungskonzept für die Entwicklung von automatisierten Systemen. Dissertation. Stuttgart: Shaker.
- MAHLER, C. (2014): Automatisierungsmodule für ein funktionsorientiertes Automatisierungsengineering. Dissertation. Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität Hamburg.
- MALER-SPEREDELOZZI, V., Y. KOREN und S.J. HU (2003): Convertibility measures for manufacturing systems. In: CIRP annals, 52 (1), S. 367-370.
- MASCHINENRICHTLINIE (2006/42/EG): Maschinenrichtlinie 2006/42/EG. Verfügbar unter: <http://www.maschinenrichtlinie.de/downloads/produkttrichtlinien-verordnung/#c6782>, [Zugriff am: 3. Dezember 2021].
- MEIXNER, K., A. LÜDER, J. HERZOG, D. WINKLER und S. BIFFL (2021): Patterns for Reuse in Production Systems Engineering. In: International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, 31, S. 1623–1659.
- MEIXNER, K., A. LÜDER, J. HERZOG, H. RÖPKE und S. BIFFL (2020): Modeling Expert Knowledge for Optimal CPPS Resource Selection for a Product Portfolio. In: 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, S. 1687-1694.
- MICHNIEWICZ, J.J. (2019): Automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung in der Montage. Dissertation. München: Technische Universität München.
- MIKUS, B. (2001): Risiken und Risikomanagement - ein Überblick. In: Risikomanagement. Berlin, Heidelberg: Springer.
- MILLER, T. und P. ELGARD (1998): Defining Modules, Modularity and Modularization: Evolution of the Concept in a Historical Perspective. Fuglsoe, Dänemark. In: Proceedings of the 13th IPS research seminar.
- MÖNCH, L. und J. BEYER (2006): Aspekte der Wirtschaftsinformatik: Methoden, Werkzeuge und Anwendungen. Erlangen: SCS-European Publishing House.
- MÖNCH, T., A. HUCHZERMEIER und P. BEBERSDORF (2022): Variable takt time groups and workload equilibrium. In: International Journal of Production Research, 60, S. 1535–1552.

- MUSIOL, K.G. (2020): Identifikation von Anwendungsfällen für einen Montageassistenten in der automobilen Endmontage am Beispiel von Schraubprozessen am Fahrzeugunterboden. Masterarbeit. Wolfenbüttel: Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften.
- NEHM, F. (2021): Umsetzung und Validierung einer rechnergestützten Planungsmethode für das Anlagenengineering in der Automobilendmontage. Bachelorarbeit. Wolfenbüttel: Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften.
- NEITZEL, R. (2013): Entwicklung wissensbasierter Systeme für die Vorrichtungskonstruktion. Wiesbaden: Springer.
- NEUGEBAUER, R. (2018): Digitalisierung. Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft. Berlin: Springer.
- NONAKA, I., H. TAKEUCHI und F. MADER (2012): Die Organisation des Wissens. Wie japanische Unternehmen eine brachliegende Ressource nutzbar machen. 2. Auflage. Frankfurt/ Main: Campus-Verlag.
- NORTH, K., A. BRANDNER und M. STEININGER (2016): Wissensmanagement für Qualitätsmanager. Erfüllung der Anforderungen nach ISO 9001:2015. Wiesbaden: Springer.
- NYHUIS, P. (2008): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum.
- NYHUIS, P., H.-P. WIENDAHL und J. REICHARDT (2009): Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsbefähiger Produktionsstätten. München: Hanser.
- OBST, M., F. DOHERR und L. URBAS (2013): Wissensbasiertes Assistenzsystem für modulares Engineering. Dresden: de Gruyter.
- PAHL, G., W. BEITZ, J. FELDHUSEN und K.-H. GROTE (2007): Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung. 7. Auflage. Berlin: Springer.
- PFROMMER, J., M. SCHLEIPEN und J. BEYERER (2013): PPRS: Production skills and their relation to product, process, and resource. In: 2013 IEEE 18th Conference Technologies & Factory Automation (ETFA), IEEE, S. 1–4.
- PHILIPP, F. (1967): Risiko und Risikopolitik. Stuttgart: Poeschel, S. 3453-3460.
- PROBST, G.J.B., S. RAUB und K. ROMHARDT (2006): Wissen managen. Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen. 5. Auflage. Wiesbaden: Gabler.
- PUPPE, F. (1991): Einführung in Expertensysteme. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- REFA (1987): Methodenlehre der Betriebsorganisation. Teil 4: Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. München: Carl Hanser Verlag.
- REFA (2022): OEE - Overall Equipment Effectiveness. Verfügbar unter: <https://refa.de/service/refa-lexikon/oeo-overall-equipment-effectiveness>, [Zugriff am: 13. November 2022].
- REHÄUSER, J. und H. KRCCMAR (2021): Wissensmanagement im Unternehmen. In: Georg Schreyögg (Hg.): Wissensmanagement. Berlin: de Gruyter.
- REINHART, G. (2000): ... nur der Wandel bleibt. Wege jenseits der Flexibilität. München: Herbert Utz Verlag.



- REINHART, G. (2017): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser.
- REINHART, G., J. BERLAK, C. EFFERT und C. SELKE (2002): Wandlungsfähige Fabrikgestaltung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 97 (1-2), S. 18-23.
- REINHART, G., J. WERNER und F. LANGE (2009): Robot based system for the automation of flow assembly lines. In: Production Engineering, 3 (1), S. 121-126.
- REINMANN-ROTHMEIER, G., H. MANDL, C. ERLACH und A. NEUBAUER (2001): Wissensmanagement lernen: Ein Leitfaden zur Gestaltung von Workshops und zum Selbstlernen. Weinheim: Beltz.
- RIECHERS, D. (2022): Analyse und Bewertung von Maßnahmen zur Optimierung der Rollkopftechnik mit Hilfe des Value Engineerings. Masterarbeit. Hochschule Hannover.
- ROEPKE, H., K. HELL, J. ZAWISZA, A. LUDER und N. SCHMIDT (2016): Identification of “Industrie 4.0” component hierarchy layers. In: IEEE 21th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, S. 1-8.
- ROMEIKE, F. (2003): Erfolgsfaktor Risiko-Management. Chance für Industrie und Handel. Methoden, Beispiele, Checklisten. Wiesbaden: Springer.
- ROMEIKE, F. (2004): Modernes Risikomanagement. Die Markt-, Kredit- und operationellen Risiken zukunftsorientiert steuern. Weinheim: Wiley-VCH-Verlag.
- RÖPKE, H. (2019): Entwicklung einer Methode zur Risikobeurteilung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering. Dissertation. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- RUDOLF, H. (2006): Wissensbasierte Montageplanung in der digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie. Dissertation. München: Technische Universität München.
- RUDTSCH, V. (2016): Methodik zur Bewertung von Produktionssystemen in der frühen Entwicklungsphase. Dissertation. Paderborn: Universität Paderborn.
- SAATY, R.W. (1987): The analytic hierarchy process - what it is and how it is used: Mathematical modelling, 9(3-5), S. 161–176.
- SARNA, M., K. MEIXNER, S. BIFFL und A. LUDER (2021): Reducing Risk in Industrial Bin Picking With PPRS Configuration and Dependency Management. In: 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, S. 1-4.
- SCHIEFER, D. (2022): AGILE SKALIERUNGSFRAMEWORKS IN DER THEORIE UND PRAXIS. Einsatzgebiete und grenzen im Vergleich. Wiesbaden: Springer.
- SCHLEIPEN, M. und R. DRATH (2009): Three-view-concept for modeling process or manufacturing plants with AutomationML. In: 2009 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, S. 1-4.
- SCHMIDT, M. (1992): Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme. Berlin: Springer, IWB Forschungsberichte, Bd. 41.
- SCHMIDT, N. (2018): Recovery planning method for production systems. Dissertation. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

- SCHOLER, M. (2018): Wandlungsfähige und angepasste Automation in der Automobilendmontage mittels durchgängigem modularem Engineering. Am Beispiel der Mensch-Roboter-Kooperation in der Unterbodenmontage. Saarbrücken: Universität des Saarlandes.
- SCHÖMANN, S.O. (2012): Produktentwicklung in der Automobilindustrie. Managementkonzepte vor dem Hintergrund gewandelter Herausforderungen. Dissertation. Wiesbaden: Springer.
- SCHRÖCK, S. (2016): Interdisziplinäre Wiederverwendung im Engineering automatisierter Anlagen. Anforderungen, Konzept und Umsetzungen für die Prozessindustrie. Dissertation. Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität Hamburg.
- SCHRÖTER, D. (2018): Entwicklung einer Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, Band 81.
- SCHUH, G. (2005): Produktkomplexität managen: Strategien-Methoden-Tools. 2. Auflage. München: Carl Hanser Verlag.
- SCHUH, G. (2012): Innovationsmanagement. Handbuch Produktion und Management 3. 2., vollst. neu bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.
- SCHULZE, T., V. HINZ und S. SCHLECHTWEG (2002): Simulation und Visualisierung 2002. In: Proceedings der Tagung "Simulation und Visualisierung 2002" Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- SCHUPPISSER, H.R. (1978): Die Gestaltung der Investitionsentscheidung unter Berücksichtigung des Risikos. Dissertation. Bern: Universität Zürich.
- SINGH, A.P. und P. TOMAR (2014): Estimation of component reusability through reusability metrics. In: International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering, 8 (11), S. 1965–1972.
- SKIRDE, H. (2015): Kostenorientierte Bewertung modularer Produktarchitekturen. Dissertation: BoD - Books on Demand.
- SKORUPPA, M. (2019): Konzipierung einer Automatikstation zur Bündelung von Schraubprozessen in der Automobilendmontage. Masterarbeit. Berlin: Beuth Hochschule für Technik Berlin.
- SMALE, D. und S. RATCHEV (2009): A Capability Model and Taxonomy for Multiple Assembly System Reconfigurations. In: IFAC Proceedings, 42 (2), S. 1923–1928.
- SMALE, D. und S. RATCHEV (2010): Application of a Reconfiguration Methodology for Multiple Assembly System Reconfigurations. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 239–246.
- SPANG, K. (2016): Projektmanagement von Verkehrsinfrastrukturprojekten. Berlin, Heidelberg: Springer.
- STACHOWIAK, H. (1973): Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer.
- STALLINGER, F., R. NEUMANN, R. PLÖSCH, P. HEHENBERGER, B. BÖHM, A. KÖHLEIN und N. GEWALD (2011): Improving mechatronical engineering: An artifact-assessment-based approach. In: IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, S. 1-8.

- STYCZNSKI, Z.A., K. RUDION und A. NAUMANN (2017): Einführung in Expertensysteme. Grundlagen, Anwendungen und Beispiele aus der elektrischen Energieversorgung. Berlin, Heidelberg: Springer.
- THIEDE, S., M. JURASCHEK und C. HERRMANN (2016): Implementing Cyber-physical Production Systems in Learning Factories. In: Procedia CIRP, 54 (3), S. 7-12.
- THRAMBOULIDIS, K. (2008): Challenges in the development of mechatronic systems: The mechatronic component. In: IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, IEEE, S. 624-631.
- TRIERWEILER, M. und T. BAUERNHANSL (2022): Reconfiguration Process for Matrix Manufacturing Systems. In: Procedia CIRP, 107, S. 699-704.
- ULRICH, H., T. DYLLICK und G. ROBST (1984): Management. Bern: Haupt.
- ULRICH, K. (1995): The role of product architecture in the manufacturing firm: Research policy, 24 (3), S. 419-440.
- UNIVERSAL ROBOTS (2018): Roboter in der Automobilindustrie. Verfügbar unter: <https://www.universal-robots.com/de/blog/roboter-in-der-automobilindustrie/>, [Zugriff am: 9. November 2021].
- VDA 4-2 (2012): Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie - Sicherung der Qualität in der Prozesslandschaft - Allgemeines, Risikoanalysen, Methoden, Vorgehensmodelle.
- VDI 2206 (2004): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 2221 (1993): Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 2343 (2001): Recycling elektrischer und elektronischer Geräte: Grundlagen und Begriffe. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 2800 (2010): Wertanalyse. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 2860 (1990): Montage- und Handhabungstechnik Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 2884 (2005): Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC). Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 3633 (2014): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 4499 (2008): Digitale Fabrik. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 5200 (2011): Fabrikplanung - Planungsvorgehen. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI/ VDE (2015): Statusreport Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0). Düsseldorf: VDI/ VDE.
- VDI/ VDE 3682 (2005): Formalisierte Prozessbeschreibung. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI/ VDE 2251 (2016): Schraubverbindungen, Spannverbindungen. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI/ VDE 2862 (2012): Mindestanforderungen zum Einsatz von Schraubsystemen und - Werkzeugen. Berlin: Beuth Verlag.

- VDI/ VDE 3695 (2010): Engineering von Anlagen; Evaluieren und optimieren des Engineerings. Berlin: Beuth Verlag.
- VOGEL-HEUSER, B., J. FUCHS, S. FELDMANN und C. LEGAT (2015): Interdisziplinärer Produktlinienansatz zur Steigerung der Wiederverwendung. *Automatisierungstechnik*, 63 (2), S. 99–110.
- VOIGT, K.-I. (2010): Risikomanagement im industriellen Anlagenbau. Konzepte und Fallstudien aus der Praxis. Berlin: Schmidt.
- WACHS, M.-L. (2019): Entwicklung eines Synchronisierungskonzeptes zur Integration von Leichtbaurobotern in der Automobilendmontage am Beispiel "Rollforming von Türdichtungen". Bachelorarbeit. Lüneburg: Leuphana Universität Lüneburg.
- WATTL, H. und H. WILDEMANN (2014): Modularisierung der Produktion in der Automobilindustrie. München: TCW Transfer-Centrum GmbH & Co. KG.
- WEBER (2018): Kollaborativ. Das MRK Schraubensystem für die Leichtbaurobotik. Verfügbar unter: [https://www.weber-online.com/wp-content/uploads/sites/2/WEBER\\_MRK-Schraubensystem.pdf](https://www.weber-online.com/wp-content/uploads/sites/2/WEBER_MRK-Schraubensystem.pdf), [Zugriff am: 13. November 2022].
- WEBER, W. (2009): Industrieroboter. Methoden der Steuerung und Regelung. 2., neu bearb. Aufl. München: Hanser.
- WEIDEMANN, U. (2017): Montagecluster zur Strukturierung der Fahrzeugendmontage – Eine Methode zur frühzeitigen Planung und Auslegung von Endmontagelinien. Dissertation. Saarbrücken: Universität des Saarlandes.
- WEIßGRAEBER, P., F. HEIECK und C. ACKERMANN (2021): Advances in Automotive Production Technology – Theory and Application. Stuttgart Conference on Automotive Production (SCAP2020). Berlin: Springer.
- WERDICH, T. (2012): FMEA - Einführung und Moderation. Durch systematische Entwicklung zur übersichtlichen Risikominimierung. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer.
- WERNER, J. (2009): Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie. München: Herbert Utz Verlag, Forschungsberichte IWB, 225.
- WESTKÄMPER, E. und E. ZAHN (2009): Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Berlin, Heidelberg: Springer.
- WESTKÄMPER, E., E. ZAHN, P. BALVE und M. TILEBEIN (2000): Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. In: *wt Werkstattstechnik online*, 90, S. 22–26.
- WESTKÄMPER, E., S. BIERSCHENK und T. KUHLMANN (2003): Digitale Fabrik - nur was für die Großen? In: *wt Werkstattstechnik online*, 93 (1/2), S. 22-26.
- WEYRICH, M. und P. KLEIN (2012a): Engineering of automated manufacturing systems with mechatronic objects. In: *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, S. 6166–6171.
- WEYRICH, M. und P. KLEIN (2012b): Modulbasiertes Engineering von Produktionsanlagen. Wissensbasierte Konzeption mit funktionsorientierter Modularisierung. In: *wt Werkstattstechnik online*, 102 (9), S. 592-597.
- WIENDAHL, H.-P. (2002): Wandlungsfähigkeit - Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. Berlin. In: *wt Werkstattstechnik online*, 92 (4), S. 122-127.

- WIENDAHL, H.-P., H.A. ELMARAGHY, P. NYHUIS, M.F. ZÄH, H.-H. WIENDAHL, N. DUFFIE und M. BRIEKE (2007): Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. CIRP annals, 56 (2), S. 783-809.
- WOLKE, T. (2015): Risikomanagement. Berlin: de Gruyter.
- YOUSSEF, A.M. und H.A. ELMARAGHY (2006): Assessment of manufacturing systems reconfiguration smoothness. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 30 (1), S. 174-193.
- ZÄH, M.F., G. REINHART, U. LINDEMANN, F. KARL und W. BIEDERMANN (2011): DMS-based evaluation of assembly manufacturing resources. In: Proceedings of the 13th International DSM Conference.
- ZÄH, M.F., N. MÖLLER und W. VOGL (2005): Symbiosis of changeable and virtual production. In: 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigural and Virtual Production (CARV), S. 3–10.
- ZAPF, M., H. PENGG, T. BÜTLER, C. BACH und C. WEINDL (2020): Kosteneffiziente und Nachhaltige Automobile. Bewertung der Realen Klimabelastung und der Gesamtkosten - Heute und in Zukunft. Wiesbaden: Springer.
- ZEMA (2018): AUTO IBN2 - Effiziente Montage- und innovative Inbetriebnahmeprozesse in der Produktion moderner Fahrzeuge. Verfügbar unter: <https://zema.de/projekt/auto-ibn%C2%B2/>, [Zugriff am: 9. November 2021].
- ZVEI (2016): Beispiele zur Verwaltungsschale der Industrie 4.0-Komponente - Basisteil. Fortentwicklung des Referenzmodells für die Industrie 4.0-Komponente. Verfügbar unter: [https://www.zvei.org/fileadmin/user\\_upload/Presse\\_und\\_Medien/Publikationen/2016/November/Beispiele\\_zur\\_Verwaltungsschale\\_der\\_Industrie\\_4.0-Komponente\\_-\\_Basisteil/Beispiele-Verwaltungsschale-Industrie-40-Komponente-White-Paper-Final.pdf](https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2016/November/Beispiele_zur_Verwaltungsschale_der_Industrie_4.0-Komponente_-_Basisteil/Beispiele-Verwaltungsschale-Industrie-40-Komponente-White-Paper-Final.pdf), [Zugriff am: 28. November 2021].
- ZWICKY, F. (1966): Entdecken, erfinden, forschen im morphologischen Weltbild. München: Droemer.
- ZWIßLER, F. und M. GEBHARDT (2013): Vorgehen zur kostentechnischen Beurteilung wandlungsfähiger Gestaltungsalternativen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 108 (5), S. 315–319.

## Anhang 1: Ableitung Forschungsbedarf

Tabelle 11: Erfüllungsgrad der Anforderungen

|  |                           | Analyse Wiederverwendbarkeit |               |               |               |               | Fähigkeitsbasierte Planung |               |               |               |
|--|---------------------------|------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|
|  |                           | Anforderung 1                | Anforderung 2 | Anforderung 3 | Anforderung 4 | Anforderung 5 | Anforderung 6              | Anforderung 7 | Anforderung 8 | Anforderung 9 |
| Themenkomplex Wiederverwendung           | Hell                      | ○                            | ○             | ◐             | ○             | ◐             | ■                          | ◐             | ■             | ■             |
|  | Klein                     | ◐                            | ◐             | ◐             | ○             | ◐             | ◐                          | ◐             | ■             | ■             |
|  | Ko, Hu & Huang            | ◐                            | ○             | ○             | ◐             | ○             | ■                          | ■             | ■             | ■             |
|  | Youssef / ELMaraghy       | ○                            | ○             | ○             | ◐             | ○             | ■                          | ■             | ■             | ■             |
|  | Hees                      | ◐                            | ○             | ○             | ◐             | ◐             | ◐                          | ◐             | ■             | ■             |
|  | Koren, Hu, Weber          | ○                            | ○             | ○             | ○             | ◐             | ■                          | ■             | ■             | ■             |
|  | Sperdelozzim Koren, Hu    | ○                            | ○             | ○             | ◐             | ○             | ■                          | ■             | ■             | ■             |
|  | Abdi                      | ○                            | ○             | ○             | ◐             | ◐             | ■                          | ■             | ■             | ■             |
|  | Zwißler                   | ◐                            | ○             | ◐             | ◐             | ○             | ■                          | ■             | ■             | ■             |
|  | Zäh, Reinhart, Lindemann, | ◐                            | ○             | ◐             | ◐             | ○             | ■                          | ■             | ■             | ■             |
|  | Abele                     | ○                            | ○             | ○             | ◐             | ○             | ■                          | ■             | ■             | ■             |
|  | Röpke                     | ○                            | ○             | ○             | ◐             | ◐             | ■                          | ■             | ■             | ■             |
| Themenkomplex Fähigkeitsbasierte Planung | Backhaus                  | ◐                            | ○             | ■             | ■             | ■             | ◐                          | ◐             | ○             | ○             |
|  | Huckaby                   | ◐                            | ○             | ■             | ■             | ■             | ◐                          | ◐             | ○             | ○             |
|  | Keddis                    | ◐                            | ○             | ■             | ■             | ■             | ◐                          | ◐             | ○             | ◐             |
|  | Kiefer                    | ○                            | ○             | ■             | ■             | ■             | ◐                          | ◐             | ○             | ○             |
|  | Obst                      | ■                            | ■             | ■             | ■             | ■             | ■                          | ■             | ◐             | ■             |
|  | Jonas                     | ◐                            | ○             | ■             | ■             | ■             | ◐                          | ◐             | ○             | ○             |
|  | Cuiper                    | ◐                            | ○             | ■             | ■             | ■             | ◐                          | ◐             | ○             | ○             |
|  | Smale & Ratchev           | ◐                            | ◐             | ■             | ◐             | ■             | ◐                          | ◐             | ◐             | ○             |
|  | Kluge                     | ◐                            | ○             | ◐             | ◐             | ■             | ◐                          | ◐             | ○             | ○             |
|  | Ferreira                  | ◐                            | ○             | ■             | ■             | ■             | ◐                          | ◐             | ○             | ○             |
|  | Järvenpää                 | ◐                            | ○             | ■             | ◐             | ■             | ◐                          | ◐             | ○             | ○             |
|  | Ahmad                     | ◐                            | ○             | ■             | ■             | ■             | ◐                          | ◐             | ○             | ○             |
|  | Michniewicz               | ◐                            | ◐             | ■             | ◐             | ■             | ◐                          | ◐             | ◐             | ○             |
|  | Hoang/ Fay                | ◐                            | ○             | ■             | ◐             | ■             | ◐                          | ◐             | ○             | ○             |

■ Anforderung kann nicht bewertet werden

○ Anforderung nicht erfüllt

◐ Anforderung gering erfüllt

◑ Anforderung zum Teil erfüllt

◒ Anforderung fast vollständig erfüllt

● Anforderung vollständig erfüllt

## Anhang 2: Bewertung Mensch-Maschine Faktor

Tabelle 12: Exemplarische Gewichtung Kriterien Mensch-Maschine Faktor

|                         | Anforderung                                | Gewichtung |
|-------------------------|--|------------|
| <b>Engineering</b>      | Datenqualität CAD-Daten                    | 1/6        |
|                         | Datenqualität Dokumentation                | 1/12       |
|                         | Datenqualität Software/ Programme          | 1/12       |
|                         | Informationen & Wissen aus Tests & Betrieb | 1/6        |
| <b>Nutzung/ Wartung</b> | Bedienbarkeit & Ergonomie                  | 1/6        |
|                         | Wartbarkeit                                | 1/6        |
|                         | Anlagen-/ Prozessüberwachung               | 1/6        |

Tabelle 13: Bewertungsskala Mensch-Maschine Faktor Engineering

| Punkte | Datenqualität:<br>CAD-Daten         | Datenqualität:<br>Dokumentationen | Datenqualität:<br>Programme | Informationen & Wissen<br>aus Tests & Betrieb |
|--------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|---|
| 0      | Nicht vorhanden                     | Nicht vorhanden                   | Nicht vorhanden             | Nicht vorhanden                               |
| 1      | Nicht intelligente Daten (zum Teil) | Sehr gering vorhanden             | Sehr gering vorhanden       | Tests der Komponenten (zum Teil)              |
| 2      | Nicht intelligente Daten            | Gering vorhanden                  | Gering vorhanden            | Tests der Komponenten                         |
| 3      | Intelligente Daten (zum Teil)       | Zum Teil vorhanden                | Zum Teil Vorhanden          | Tests des System (stationär)                  |
| 4      | Intelligente Daten                  | Fast vollständig vorhanden        | Fast vollständig vorhanden  | Tests des System (im fließen)                 |
| 5      | Kinematisierte intelligente Daten   | Vollständig vorhanden             | Vollständig vorhanden       | Betrieb des Systems                           |

Tabelle 14: Bewertungsskala Mensch-Maschine Faktor Nutzung/ Wartung

| Punkte | Bedienbarkeit/ Ergonomie   | Wartbarkeit              | Anlagen- und Prozess-<br>überwachung   |
|--------|----------------------------|--------------------------|--|
| 0      | Keine Bedienbarkeit        | Keine Ergonomie          | Keine Überwachung  |
| 1      | Sehr geringe Bedienbarkeit | Sehr geringe Wartbarkeit | Anlagenzustandsüberwachung   |
| 2      | Geringe Bedienbarkeit      | Geringe Wartbarkeit      | Anlagenzustandsüberwachung und Prozessparameterüberwachung (mit Einschränkungen) |
| 3      | Mittlere Bedienbarkeit     | Mittlere Wartbarkeit     | Anlagenzustandsüberwachung und Prozessparameterüberwachung                       |
| 4      | Gute Bedienbarkeit         | Gute Bedienbarkeit       | Condition Monitoring (mit Einschränkungen)                                       |
| 5      | Sehr gute Bedienbarkeit    | Sehr gute Wartbarkeit    | Condition Monitoring   |

## Anhang 3: Attribute Anforderungsmodell

Im Folgenden werden die relevanten Attribute von Produkt und Prozess beschrieben. Ebenso werden die spezifischen Attribute für Schraubprozesse erläutert.

### Produkt- und Prozessneutrale Attribute

- *Bezeichnung*: Alle Produkte und Prozesse erhalten eine eindeutige Bezeichnung, mit Hilfe derer eine einfache Identifikation und Verwaltung dieser erfolgen kann.
- *Einbaurrate*: Gibt die Häufigkeit eines Produktes bzw. einer Produktvariante auf der Montagelinie an. Diese Information ist für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit relevant.
- *Selbsthaltung*: Die Selbsthaltung wird als Eigenschaft definiert, die Bauteile besitzen, die nach der Positionierung in ihrer Fügeposition ohne die Hilfe zusätzlicher Verbindungselemente verbleiben.
- *Fügerangfolge*: Beschreibt welches Bauteil vor welchen anderen Bauteil gefügt werden muss (Lotter und Wiendahl 2012). Insbesondere für die Zusammenfassung von Produkten und Prozessen ist die Fügerangfolge ein wichtiges Kriterium.
- *Fügeposition*: Beschreibt den Bereich und die Position von Bauteilen und Verbindungselementen im Fahrzeug. Ressourcen müssen für den jeweiligen Bereich kompatibel sein und eine ausreichend hohe Reichweite besitzen.
- *Toleranz Fügeposition*: Beschreibt die Toleranzen der Position des Bauteils oder Verbindungselements. Die jeweilige Ressource muss die Fähigkeit besitzen, unter Einwirkung dieser Toleranzen das Bauteil oder Verbindungselement prozesssicher zu fügen.
- *Fertigungszeit*: Ist für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Ressourcen relevant.
- *Montagelinienabschnitt*: Beschreibt die Position des Prozesses in der Montagelinie. Auf Basis des Montagelinienabschnittes können weitere Informationen entnommen werden wie die Art der Fördertechnik oder des Fließprinzips.

### Schrauben spezifische Attribute:

- *Typ Verbindungselement*: Der Typ beschreibt ob es sich z. B. um eine Mutter, einer Schraube oder einer Schraube mit fest angebundener Unterlegscheibe handelt.
- *Kraftangriff*: Der Kraftangriff ist für die Auswahl eines Schraubwerkzeuges notwendig.
- *Durchmesser*: Mit Hilfe des Durchmessers der Schraube bzw. des Schraubenkopfs ist eine passende Ressource für die Bereitstellung und Zuführung der Schraube auszuwählen.



- *Länge*: Wie auch der Durchmesser ist die Länge der Schraube notwendig. Insbesondere das Verhältnis aus Durchmesser/ Länge gibt Auskunft darüber, ob ein Zuschießen der Schraube mit Hilfe eines Rundschlauchs möglich ist (Hesse und Malisa 2020).
- *Werkstoff*: Der Werkstoff der Schraube kann für die Auswahl eines Schraubwerkzeugs eine Rolle spielen, falls dieses einen magnetischen Werkstoff der Schraube fordert.
- *Zugänglichkeit*: Die Zugänglichkeit beschreibt, ob ein verlängerter Abtrieb am Schraubenwerkzeug notwendig ist, um Fügepositionen mit einen höheren Versatz oder vielen Störkonturen erreichen zu können.
- *Kategorie Verschraubung*: Wie in Kapitel 2.3.2 bereits beschrieben, wird über die Kategorie die Mindestanforderung an das Schraubsystem definiert.
- *Drehmoment*: Mit der Information des Drehmoments sind passende Schraubwerkzeuge und auch Robotersysteme auszuwählen.
- *Drehwinkel*: Schraubwerkzeuge müssen häufig die Option des Drehwinkelgesteuerten Schraubens besitzen.
- *Drehzahl*: Beim Schrauben können unter anderem für die verschiedenen Schraubverfahren unterschiedliche Drehzahlen gefordert werden. Hierfür ist eine Parametrisierung der Drehzahl über das Schraubwerkzeug zu ermöglichen.

## Anhang 4: Attribute Fähigkeiten

In der Tabelle 15 und Tabelle 16 werden die Attribute von zusammengesetzten und elementaren Fähigkeiten ausgehend der Attribute des Anforderungsmodells dargestellt.

Tabelle 15: Attribute zusammengesetzte Fähigkeiten

|                         | Bereitstellen<br>Produkt | Ein- &<br>Endverschrauben<br>Produkt | Endverschrauben<br>Produkt |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| Bezeichnung Produkt     | X                        | X                                    | X                          |
| Bezeichnung Teilprozess | X                        | X                                    | X                          |
| Einbaurrate             |                          | X                                    | X                          |
| Montagelinienabschnitt  |                          | X                                    | X                          |
| Selbsthaltung           |                          | X                                    | X                          |
| Fügerangfolge           |                          | X                                    | X                          |
| Fügeposition            |                          | X                                    | X                          |
| Toleranz Fügeposition   |                          | X                                    | X                          |
| Typ Verbindungselement  | X                        | X                                    | X                          |
| Kraftangriff            | X                        | X                                    | X                          |
| Durchmesser             | X                        | X                                    |                            |
| Länge                   | X                        | X                                    |                            |
| Werkstoff               | X                        | X                                    |                            |
| Zugänglichkeit          |                          | X                                    | X                          |
| Kategorie Verschraubung |                          | X                                    | X                          |
| Prozesszeit             | X                        | X                                    | X                          |
| Drehmoment              |                          | X                                    | X                          |
| Drehwinkel              |                          | X                                    | X                          |
| Drehzahl                |                          | X                                    | X                          |

## Anhang 5: Regeln zur Zusammenfassung von Attributen

Tabelle 16: Attribute elementare Fähigkeiten seitens Produkt und Prozess

|                         | Kontrolle Prozessstart | Kontrolle Fahrzeugtyp | Kontrolle Fahrzeugposition | Bewegen Fahrzeugposition | Kontrolle Fügeposition | Bewegen Fügeposition | Ausgleich Positionsdifferenzen | Kontrolle Lochdeckung/ Bauzustand | Bestücken Werkzeug | Einschrauben Schraube | Nachführen Werkzeug | Endverschrauben Schraube | Kontrolle Schraubparameter | Bewegen Ausgangsposition | Bestücken Magazin |
|-------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------|----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------|
| Bezeichnung Produkt     |                        |                       |                            |                          | X                      | X                    | X                              | X                                 | X                  | X                     |                     | X                        | X                          |                          | X                 |
| Bezeichnung Teilprozess | X                      | X                     | X                          | X                        | X                      | X                    | X                              | X                                 | X                  | X                     | X                   | X                        | X                          | X                        | X                 |
| Montagelinienabschnitt  | X                      | X                     | X                          | X                        | X                      | X                    |                                |                                   |                    |                       |                     |                          |                            | X                        |                   |
| Fügeposition            |                        |                       |                            |                          |                        | X                    |                                |                                   |                    |                       |                     |                          |                            |                          |                   |
| Toleranz Fügeposition   |                        |                       |                            |                          | X                      |                      | X                              | X                                 |                    | X                     |                     | X                        |                            |                          |                   |
| Typ Verbindungselement  |                        |                       |                            |                          |                        |                      | X                              | X                                 | X                  | X                     | X                   | X                        |                            |                          | X                 |
| Kraftangriff            |                        |                       |                            |                          |                        |                      | X                              | X                                 | X                  | X                     |                     | X                        |                            |                          | X                 |
| Durchmesser             |                        |                       |                            |                          |                        |                      |                                |                                   | X                  | X                     |                     | X                        |                            |                          | X                 |
| Länge                   |                        |                       |                            |                          |                        |                      |                                |                                   | X                  | X                     | X                   | X                        |                            |                          | X                 |
| Werkstoff               |                        |                       |                            |                          |                        |                      |                                |                                   | X                  | X                     |                     | X                        |                            |                          | X                 |
| Zugänglichkeit          |                        |                       |                            |                          |                        | X                    |                                |                                   |                    | X                     | X                   | X                        |                            |                          |                   |
| Kategorie Verschraubung |                        |                       |                            |                          |                        |                      |                                |                                   | X                  | X                     |                     | X                        | X                          |                          |                   |
| Prozesszeit             | X                      | X                     | X                          | X                        | X                      | X                    | X                              | X                                 | X                  | X                     | X                   | X                        | X                          | X                        | X                 |
| Drehmoment              |                        |                       |                            |                          |                        |                      |                                |                                   |                    | X                     |                     | X                        | X                          |                          |                   |
| Drehwinkel              |                        |                       |                            |                          |                        |                      |                                |                                   |                    | X                     |                     | X                        | X                          |                          |                   |
| Drehzahl                |                        |                       |                            |                          |                        |                      |                                |                                   |                    | X                     |                     | X                        | X                          |                          |                   |

## Anhang 5: Regeln zur Zusammenfassung von Attributen

In der Tabelle 17 werden die Regeln zur Zusammenfassung von Attributen dargestellt.

Tabelle 17: Regeln zur Zusammenfassung von Attributen

| Enumeration   | Minimum  | Schnittmenge  | Bereich  | Summe  |
|---|--|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Selbsthaltung</li> <li>Montagelinienabschnitt</li> <li>Fügeposition</li> <li>Typ Verbindungselement</li> <li>Kraftangriff</li> <li>Durchmesser</li> <li>Länge</li> <li>Werkstoff</li> <li>Kategorie Verschraubung</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Toleranz Fügeposition</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Fügerangfolge</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Drehmoment</li> <li>Drehzahl</li> <li>Drehwinkel</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Einbaurate</li> </ul> |
|   | <div style="background-color: #004a7c; color: white; padding: 5px; text-align: center;">Maximum</div> <ul style="list-style-type: none"> <li>Fertigungszeit</li> <li>Zugänglichkeit</li> </ul> |   |  |  |

## Anhang 6: Attribute Ressourcen

In der Abbildung 75 und der Abbildung 76 werden die Attribute für die Funktionsgruppe des Ein- und Endverschraubens und der Komponenten Roboter sowie Kamerasystem dargestellt, welche für die erste Anwendung der Methode dieser Arbeit als relevant identifiziert wurden. Mit Hilfe weiterer Anwendungen sind diese Attribute zu evaluieren und zu ergänzen.

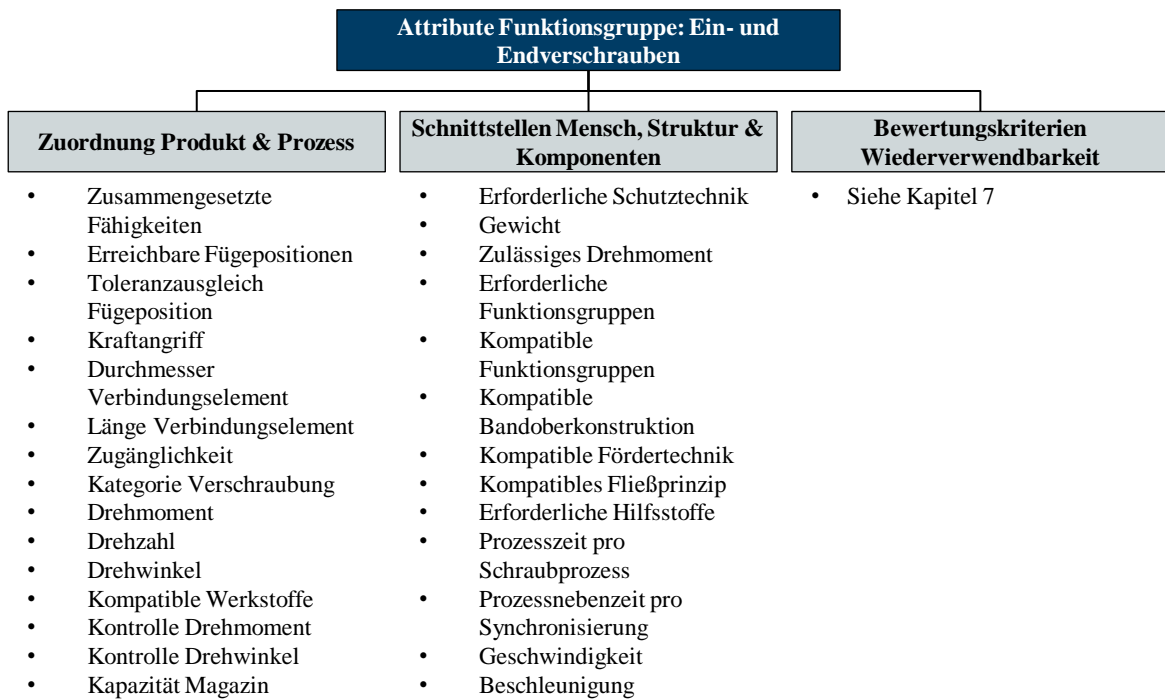


Abbildung 75: Attribute einer Funktionsgruppe für das Ein- und Endverschrauben



Abbildung 76: Attribute eines Roboters

In der Abbildung 77 sind erste mögliche Attribute eines Kamerasystems aufgeführt. Elementare Fähigkeiten eines Kamerasystems sind z. B. die Kontrolle Prozessstart, Fahrzeugposition, Fügeposition, Lochdeckung und Bauzustand. Zur Spezifikation der Fähigkeiten ist

es zielführend die Fähigkeiten zusammen mit weiteren Attributen wie z. B. dem Material und der Farbe des zu kontrollierenden Objekts, Art und Weise der Identifikation, Objektive, Fokuseinstellung, Auflösung, Beleuchtung und Filter zu beschreiben. Über Versuche mit Kamerasystemen in verschiedenen Anwendungen sind diese Attribute sowie weitere Attribute jedoch kontinuierlich zu überprüfen und anzupassen. Weitere allgemeine Attribute bzw. Eigenschaften für Sensoriken werden u. a. in (Hompele, Büchter und Franzke 2007, Hompele und Schmidt 2010) aufgeführt. Diese sind innerhalb der Versuche ebenso hinsichtlich ihrer Relevanz zu überprüfen.

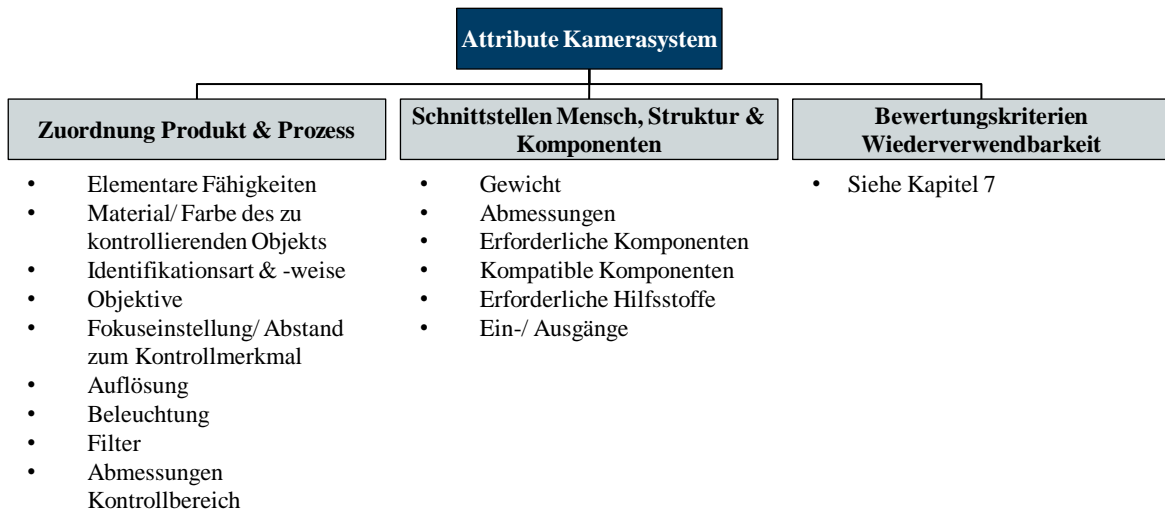


Abbildung 77: Attribute eines Kamerasystems

## Anhang 7: Vorgehen zur Optimierung der Zuordnung von PPR

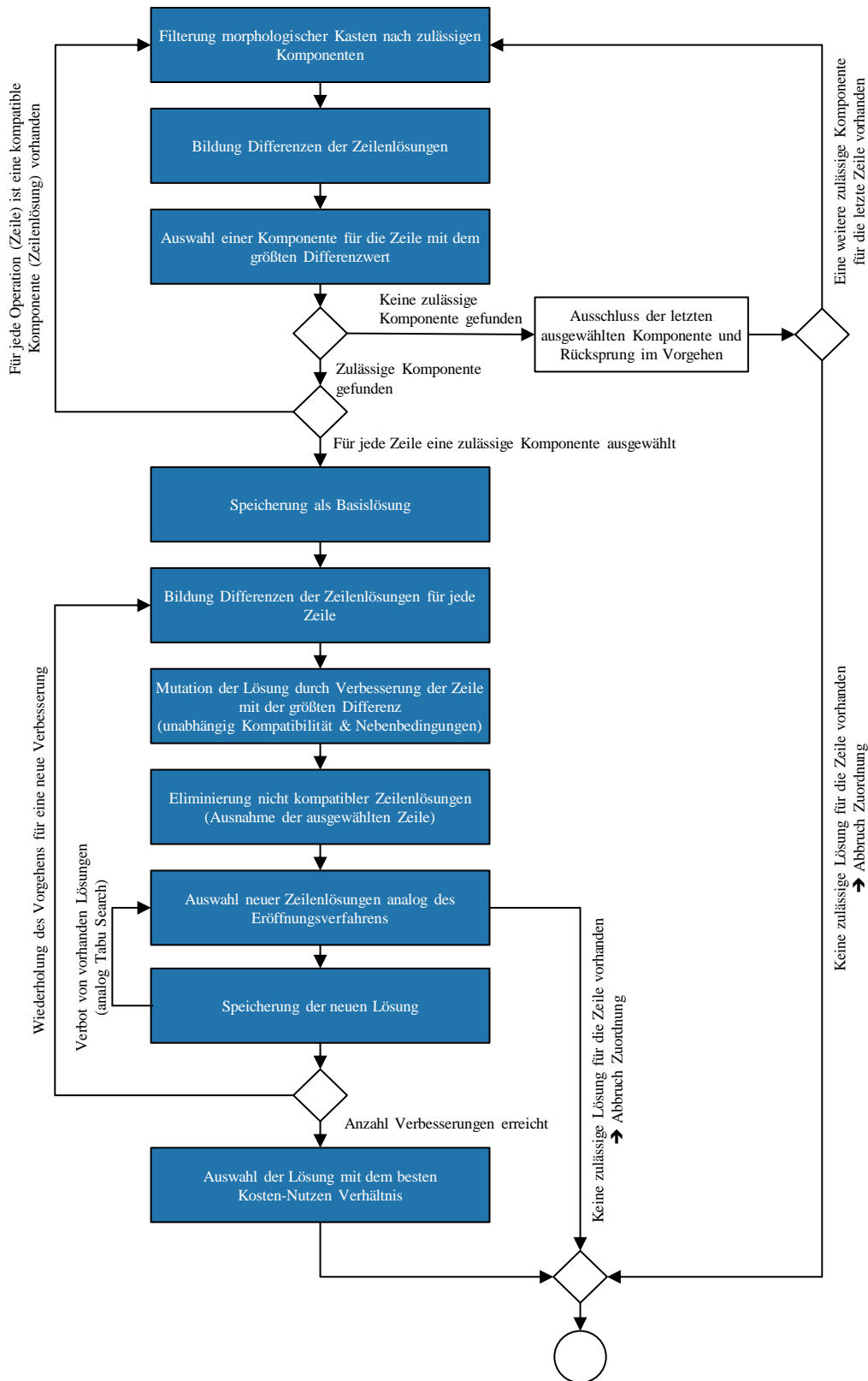


Abbildung 78: Vorgehen zur Optimierung der Zuordnung von PPR

## Anhang 8: Regeln zur Konfiguration des Montageassistenten

In der Tabelle 18 sind Regeln für die Konfiguration des Montageassistenten dargestellt. Die Regel 01 stellt z. B. den Fall dar, dass alle Bedingungen erfüllt werden (durch ein J gekennzeichnet). Folgend stellt sich die betrachtete Lösung als zulässig heraus. In den weiteren Regeln sind die Fälle beschrieben, falls eine spezifische Bedingung nicht erfüllt wird (mit einem N gekennzeichnet). Insgesamt können somit drei verschiedene Aktionen eintreten:

- Lösung ist zulässig
- Lösung ist zulässig, jedoch sind weitere Lösungen für die Schutztechnik erforderlich
- Lösung ist nicht zulässig

Tabelle 18: Regeln zur Auswahl eines Manipulators

| Bedingungen   | Regeln |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|   | 01     | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 |
| Typ Bandoberkonstruktion = Schienensystem   | J      | N  | J  | J  | J  | J  | J  | J  | J  | J  |
| Traglast Bandoberkonstruktion => Gewicht Funktionsgruppe                            | J      | J  | N  | J  | J  | J  | J  | J  | J  | J  |
| Fördertechnik = Skid  | J      | J  | J  | N  | J  | J  | J  | J  | J  | J  |
| Fließprinzip = Fließbetrieb   | J      | J  | J  | J  | N  | J  | J  | J  | J  | J  |
| Traglast Manipulator => Gewicht Roboter und Werkzeuge                               | J      | J  | J  | J  | J  | N  | J  | J  | J  | J  |
| Fügeposition = Bereich X oder Y (abhängig Manipulator)                              | J      | J  | J  | J  | J  | J  | N  | J  | J  | J  |
| Kompatibilität der Schnittstellen (Schienensystem, Roboter, Anlagensteuerung, etc.) | J      | J  | J  | J  | J  | J  | J  | N  | J  | J  |
| Sicherheit Mitarbeiter gegenüber Roboter  | J      | J  | J  | J  | J  | J  | J  | J  | N  | J  |
| Sicherheit Mitarbeiter während des Zurückfahrens in die Ausgangsposition            | J      | J  | J  | J  | J  | J  | J  | J  | J  | N  |

|  | Aktionen |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|  | 01       | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 |
| Lösung ist zulässig                    | X        |    |    |    |    |    |    |    | X  | X  |
| Lösung ist nicht zulässig              |          | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  |    |    |
| Zusätzliche Schutztechnik erforderlich |          |    |    |    |    |    |    |    | X  | X  |

## Anhang 9: Schraubprozesse Montagelinienabschnitt 1 und 2

Tabelle 19: Schraubprozesse Teil 1

| Nr. | Produkt/ Prozess                         | Fügeposition<br>X (mm) | Fügeposition<br>Y (mm) | Fügeposition<br>Z (mm) | Fügeposition -<br>Bauraum | Prozesszeit<br>(Sekunden) | Toleranz (± mm) | Kraftangriff | Einbaurrate | Kategorie<br>Verschraubung | Max. Drehmo-<br>ment (Nm) | Min. Drehmo-<br>ment (Nm) | Max. Drehwinkel<br>(°) | Min. Drehwinkel<br>(°) | Fügerangfolge<br>(Gruppe) |
|-----|--|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|--------------|-------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|
| 1   | Lagerbock/ Gasdruckfeder HKL links 1     | 2926                   | -584                   | 966                    | A6                        | 6,05                      | 0               | T30          | 1           | A                          | 20                        | 20                        | 90                     | 90                     | 1,2,3,4,5,6               |
| 2   | Lagerbock/ Gasdruckfeder HKL links 2     | 2802                   | -572                   | 1020                   | A6                        | 6,05                      | 0               | T30          | 1           | A                          | 20                        | 20                        | 90                     | 90                     | 1,2,3,4,5,6               |
| 3   | Lagerbock/ Gasdruckfeder HKL rechts 1    | 2926                   | 584                    | 966                    | A6                        | 6,05                      | 0               | T30          | 1           | A                          | 20                        | 20                        | 90                     | 90                     | 1,2,3,4,5,6               |
| 4   | Lagerbock/ Gasdruckfeder HKL rechts 2    | 2802                   | 572                    | 1020                   | A6                        | 6,05                      | 0               | T30          | 1           | A                          | 20                        | 20                        | 90                     | 90                     | 1,2,3,4,5,6               |
| 5   | Massemutter Motorraum lösen 1            | -128                   | -327                   | 96                     | A1                        | 4,72                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 8                         | 8                         | 0                      | 0                      | 1,2,3,4                   |
| 6   | Massemutter Motorraum lösen 2            | -237                   | -338                   | 98                     | A1                        | 4,72                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 8                         | 8                         | 0                      | 0                      | 1,2,3,4                   |
| 7   | Massemutter Motorraum lösen 3            | -135                   | -482                   | 335                    | A1                        | 4,72                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 8                         | 8                         | 0                      | 0                      | 1,2,3,4                   |
| 8   | Massemutter Motorraum lösen 4            | -136                   | 474                    | 335                    | A1                        | 4,72                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 8                         | 8                         | 0                      | 0                      | 1,2,3,4                   |
| 9   | Massemutter Motorraum lösen 5            | -39                    | 459                    | 288                    | A1                        | 4,72                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 8                         | 8                         | 0                      | 0                      | 1,2,3,4                   |
| 10  | Massemutter Innenraum lösen 1            | 356                    | -522                   | 6                      | A2                        | 4,72                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 1,2,3,4                   |
| 11  | Massemutter Innenraum lösen 2            | 575                    | -44                    | 44                     | B2                        | 4,72                      | 5               | SW12         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 1,2,3,4                   |
| 12  | Massemutter Innenraum lösen 3            | 2732                   | 603                    | 597                    | C5                        | 4,72                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 1,2,3,4                   |
| 13  | Massemutter Innenraum lösen 4            | 344                    | 569                    | 24                     | C2                        | 4,72                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 1,2,3,4                   |
| 14  | Massemutter Innenraum lösen 5            | 342                    | 508                    | 12                     | C2                        | 4,72                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 1,2,3,4                   |
| 15  | Massemutter Innenraum lösen 6            | 2732                   | -603                   | 597                    | A5                        | 4,72                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 1,2,3,4                   |
| 16  | Sensor Querbeschleunigung B-Säule links  | 1367                   | 747                    | 92                     | C3                        | 6,05                      | 0               | T30          | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 1,2,3,4,5,6               |
| 17  | Sensor Querbeschleunigung C-Säule links  | 2494                   | -694                   | 607                    | C3                        | 6,05                      | 0               | T30          | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 1,2,3,4,5,6               |
| 18  | Sensor Querbeschleunigung B-Säule rechts | 1367                   | 747                    | 92                     | A3                        | 6,05                      | 0               | T30          | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 1,2,3,4,5,6               |
| 19  | Sensor Querbeschleunigung C-Säule rechts | 2494                   | 694                    | 607                    | A3                        | 6,05                      | 0               | T30          | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 1,2,3,4,5,6               |
| 20  | Airbagsteuergerät lösen 1                | 332                    | -18                    | 101                    | B2                        | 4,16                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 1,2                       |
| 21  | Airbagsteuergerät lösen 2                | 332                    | 51                     | 101                    | B2                        | 4,16                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 1,2                       |
| 22  | Airbagsteuergerät lösen 3                | 452                    | 6                      | 99                     | B2                        | 4,16                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 1,2                       |
| 23  | Airbagsteuergerät schrauben 1            | 332                    | -18                    | 101                    | B2                        | 5,04                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 3,4                       |
| 24  | Airbagsteuergerät schrauben 2            | 332                    | 51                     | 101                    | B2                        | 5,04                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 3,4                       |



## Anhang 9: Schraubprozesse Montagelinienabschnitt 1 und 2

Tabelle 20: Schraubprozesse Teil 2

| Nr. | Produkt/ Prozess                   | Fügeposition X (mm) | Fügeposition Y (mm) | Fügeposition Z (mm) | Fügeposition - Bauraum | Prozesszeit (Sekunden) | Toleranz (± mm) | Kraftangriff | Einbaureate | Kategorie Verschraubung | Max. Drehmoment (Nm) | Min. Drehmoment (Nm) | Max. Drehwinkel (°) | Min. Drehwinkel (°) | Fügerangfolge (Gruppe) |
|-----|------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|-----------------|--------------|-------------|-------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| 25  | Airbagsteuergerät schrauben 3      | 452                 | 6                   | 99                  | B2                     | 5,04                   | 5               | SW10         | 1           | A                       | 9                    | 9                    | 0                   | 0                   | 3,4                    |
| 26  | Fußhebelwerk 1                     | 142                 | -306                | 412                 | C2                     | 3,59                   | 0               | SW13         | 1           | A                       | 20                   | 20                   | 0                   | 0                   | 1,2,3,4                |
| 27  | Fußhebelwerk 2                     | 137                 | -285                | 355                 | C2                     | 3,59                   | 0               | SW13         | 1           | A                       | 20                   | 20                   | 0                   | 0                   | 1,2,3,4                |
| 28  | Fußhebelwerk 3                     | 161                 | -215                | 130                 | C2                     | 3,59                   | 0               | SW13         | 1           | A                       | 20                   | 20                   | 0                   | 0                   | 1,2,3,4                |
| 29  | Fußhebelwerk 4                     | 142                 | -183                | 355                 | C2                     | 3,59                   | 0               | SW13         | 1           | A                       | 20                   | 20                   | 0                   | 0                   | 1,2,3,4                |
| 30  | Fußhebelwerk 5                     | 154                 | -175                | 462                 | C2                     | 3,59                   | 0               | SW13         | 1           | A                       | 20                   | 20                   | 0                   | 0                   | 1,2,3,4                |
| 31  | Halter ZSB Hydroaggregat 1         | 115                 | 403                 | 185                 | A1                     | 5,3                    | 0               | SW13         | 1           | A                       | 20                   | 20                   | 0                   | 0                   | 1,3                    |
| 32  | Halter ZSB Hydroaggregat 2         | 87                  | 291                 | 129                 | A1                     | 5,3                    | 0               | SW13         | 1           | A                       | 20                   | 20                   | 0                   | 0                   | 1,3                    |
| 33  | Halter ZSB Hydroaggregat 3         | -20                 | 396                 | 187                 | A1                     | 5,3                    | 0               | SW13         | 1           | A                       | 20                   | 20                   | 0                   | 0                   | 1,3                    |
| 34  | Gurthöhenversteller B-Säule links  | 1596                | -639                | 988                 | C3                     | 7,18                   | 0               | N10          | 1           | A                       | 20                   | 20                   | 0                   | 0                   | 1,2,3,4,5,6            |
| 35  | Gurtstraffer B-Säule links         | 1465                | -714                | 113                 | C3                     | 4,92                   | 0               | N10          | 1           | A                       | 40                   | 40                   | 0                   | 0                   | 1,2,3,4,5,6            |
| 36  | Gurtbandführung B-Säule links      | 1582                | -628                | 924                 | C3                     | 6,05                   | 0               | N10          | 1           | A                       | 40                   | 40                   | 0                   | 0                   | 1,2,3,4,5,6            |
| 37  | Gurtendbeschlag B-Säule links      | 1450                | -667                | 0                   | C3                     | 4,92                   | 0               | SW17         | 1           | A                       | 40                   | 40                   | 0                   | 0                   | 1,2,3,4,5,6            |
| 38  | Gurtendbeschlag C-Säule links      | 2259                | -819                | 164                 | C4                     | 4,92                   | 0               | SW17         | 1           | A                       | 40                   | 40                   | 0                   | 0                   | 1,2,3,4,5,6            |
| 39  | Gurtstraffer C-Säule links         | 2792                | -624                | 812                 | C5                     | 4,92                   | 0               | N10          | 1           | A                       | 40                   | 40                   | 0                   | 0                   | 1,2,3,4,5,6            |
| 40  | Gurthöhenversteller B-Säule rechts | 1596                | 639                 | 988                 | A3                     | 7,18                   | 0               | N10          | 1           | A                       | 20                   | 20                   | 0                   | 0                   | 1,2,3,4,5,6            |
| 41  | Gurtstraffer B-Säule rechts        | 1456                | 714                 | 113                 | A3                     | 4,92                   | 0               | N10          | 1           | A                       | 40                   | 40                   | 0                   | 0                   | 1,2,3,4,5,6            |
| 42  | Gurtbandführung B-Säule rechts     | 1582                | 628                 | 924                 | A3                     | 6,05                   | 0               | N10          | 1           | A                       | 40                   | 40                   | 0                   | 0                   | 1,2,3,4,5,6            |
| 43  | Gurtendbeschlag B-Säule rechts     | 1450                | 667                 | 0                   | A3                     | 4,92                   | 0               | SW17         | 1           | A                       | 40                   | 40                   | 0                   | 0                   | 1,2,3,4,5,6            |
| 44  | Gurtendbeschlag C-Säule rechts     | 2259                | 819                 | 164                 | A4                     | 4,92                   | 0               | SW17         | 1           | A                       | 40                   | 40                   | 0                   | 0                   | 1,2,3,4,5,6            |
| 45  | Gurtstraffer C-Säule rechts        | 2792                | 624                 | 812                 | A5                     | 4,92                   | 0               | N10          | 1           | A                       | 40                   | 40                   | 0                   | 0                   | 1,2,3,4,5,6            |
| 46  | Bremsdruckleitung 1                | 36                  | 379                 | 378                 | A1                     | 6,34                   | 0               | SW11         | 1           | A                       | 14                   | 14                   | 0                   | 0                   | 2,4,6                  |
| 47  | Bremsdruckleitung 2                | 59                  | 379                 | 383                 | A1                     | 6,34                   | 0               | SW11         | 1           | A                       | 14                   | 14                   | 0                   | 0                   | 2,4,6                  |
| 48  | Bremsdruckleitung 3                | 82                  | 379                 | 384                 | A1                     | 7,48                   | 0               | SW11         | 1           | A                       | 14                   | 14                   | 0                   | 0                   | 2,4,6                  |
| 49  | Bremsdruckleitung 4                | 105                 | 379                 | 383                 | A1                     | 6,34                   | 0               | SW11         | 1           | A                       | 14                   | 14                   | 0                   | 0                   | 2,4,6                  |

## Anhang 9: Schraubprozesse Montagelinienabschnitt 1 und 2

Tabelle 21: Schraubprozesse Teil 3

| Nr. | Produkt/ Prozess                  | Fügeposition<br>X (mm) | Fügeposition<br>Y (mm) | Fügeposition<br>Z (mm) | Fügeposition -<br>Bauraum | Prozesszeit<br>(Sekunden) | Toleranz (± mm) | Kraftangriff | Einbaureate | Kategorie<br>Verschraubung | Max. Drehmo-<br>ment (Nm) | Min. Drehmo-<br>ment (Nm) | Max. Drehwinkel<br>(°) | Min. Drehwinkel<br>(°) | Fügerangfolge<br>(Gruppe) |
|-----|-----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|--------------|-------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|
| 50  | Bremsdruckleitung 5               | 105                    | 347                    | 363                    | A1                        | 6,34                      | 0               | SW11         | 1           | A                          | 14                        | 14                        | 0                      | 0                      | 2,4,6                     |
| 51  | Bremsdruckleitung 6               | 36                     | 345                    | 363                    | A1                        | 6,34                      | 0               | SW11         | 1           | A                          | 14                        | 14                        | 0                      | 0                      | 2,4,6                     |
| 52  | Bremsdruckleitung 7               | -78                    | -194                   | 393                    | A1                        | 6,34                      | 0               | SW11         | 1           | A                          | 14                        | 14                        | 0                      | 0                      | 2,4,6                     |
| 53  | Bremsdruckleitung 8               | -161                   | -218                   | 400                    | A1                        | 6,34                      | 0               | SW11         | 1           | A                          | 14                        | 14                        | 0                      | 0                      | 2,4,6                     |
| 54  | Massemutter Motorraum schrauben 1 | -128                   | -327                   | 96                     | A1                        | 4,91                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 5,6                       |
| 55  | Massemutter Motorraum schrauben 2 | -237                   | -338                   | 98                     | A1                        | 4,91                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 5,6                       |
| 56  | Massemutter Motorraum schrauben 3 | -135                   | -482                   | 335                    | A1                        | 4,91                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 5,6                       |
| 57  | Massemutter Motorraum schrauben 4 | -136                   | 474                    | 335                    | A1                        | 4,91                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 5,6                       |
| 58  | Massemutter Motorraum schrauben 5 | -39                    | 459                    | 288                    | A1                        | 4,91                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 5,6                       |
| 59  | Massemutter Innenraum schrauben 1 | 356                    | -522                   | 6                      | A2                        | 4,91                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 5,6                       |
| 60  | Massemutter Innenraum schrauben 2 | 575                    | -44                    | 44                     | B2                        | 4,91                      | 5               | SW12         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 5,6                       |
| 61  | Massemutter Innenraum schrauben 3 | 2732                   | 603                    | 597                    | C5                        | 4,91                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 5,6                       |
| 62  | Massemutter Innenraum schrauben 4 | 344                    | 569                    | 24                     | C2                        | 4,91                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 5,6                       |
| 63  | Massemutter Innenraum schrauben 5 | 342                    | 508                    | 12                     | C2                        | 4,91                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 5,6                       |
| 64  | Massemutter Innenraum schrauben 6 | 2732                   | -603                   | 597                    | A5                        | 4,91                      | 5               | SW10         | 1           | A                          | 9                         | 9                         | 0                      | 0                      | 5,6                       |

## Anhang 10: Konfigurierte Anlagenkonzepte Montageassistent

Tabelle 22: Konfigurierte Anlagenkonzepte - Teil 1

| Lösung | Komponenten   | Prozesse  | KNV<br>(normiert) | Zykluszeit<br>(s) |
|--------|---|---|-------------------|-------------------|
| 1      | Mitarbeiter (manuell)<br>Manipulator Vorderwagen (manuell)<br>UR10e<br>Keine Kamera<br>Federgespanntes Nachführen<br>Apex Cobotspindel 38 mit Aufsatz SW10  | Massemutter Motorraum lösen 1<br>Massemutter Motorraum lösen 2<br>Massemutter Motorraum lösen 3<br>Massemutter Motorraum lösen 4<br>Massemutter Motorraum lösen 5                                       | 0,99              | 46,4              |
| 2      | Mitarbeiter (manuell)<br>Manipulator Vorderwagen (manuell)<br>UR10e<br>Kraft-Momenten-Sensorik<br>Sensitives Nachführen<br>Apex Cobotspindel 38 mit Aufsatz SW13                                      | Halter ZSB Hydroaggregat 1<br>Halter ZSB Hydroaggregat 2<br>Halter ZSB Hydroaggregat 3  | 1                 | 36,5              |
| 3      | Mitarbeiter (manuell)<br>Manipulator vorderer Innenraum (manuell)<br>UR10e<br>Keine Kamera<br>Federgespanntes Nachführen<br>Apex Cobotspindel 38 mit Aufsatz SW10                                     | Massemutter Innenraum lösen 2<br>Massemutter Innenraum lösen 4<br>Massemutter Innenraum lösen 5<br>Airbagsteuergerät lösen 1<br>Airbagsteuergerät lösen 2<br>Airbagsteuergerät lösen 3                  | 0,76              | 50,5              |
| 4      | Mitarbeiter (manuell)<br>Manipulator vorderer Innenraum (manuell)<br>UR10e<br>Kraft-Momenten-Sensorik (Taktile)<br>Sensitives Nachführen<br>Apex Cobotspindel 38 mit Aufsatz SW13                     | Fußhebelwerk 1<br>Fußhebelwerk 2<br>Fußhebelwerk 3<br>Fußhebelwerk 4<br>Fußhebelwerk 5  | 0,55              | 12,95             |
| 5      | Mitarbeiter (manuell)<br>Manipulator vorderer Innenraum mit Ausleger (manuell)<br>UR10e<br>Kamera<br>Federgespanntes Nachführen<br>Apex Cobotspindel 61 mit Aufsatz N10                               | Gurthöhenversteller B-Säule links<br>Gurthöhenversteller B-Säule rechts<br>Gurtbandführung B-Säule links<br>Gurtbandführung B-Säule rechts<br>Gurtstraffer B-Säule links<br>Gurtstraffer B-Säule rechts | 0,45              | 31,3              |
| 6      | Mitarbeiter (manuell)<br>Manipulator vorderer Innenraum mit Ausleger (manuell)<br>UR5e oder iiwa7<br>Kraft-Momenten-Sensor (Taktile)<br>Sensitives Nachführen<br>Apex Cobotspindel 38 mit Aufsatz T30 | Sensor Querbeschleunigung B-Säule links<br>Sensor Querbeschleunigung C-Säule links<br>Sensor Querbeschleunigung B-Säule rechts<br>Sensor Querbeschleunigung C-Säule rechts                              | 0,71              | 43,3              |

## Anhang 10: Konfigurierte Anlagenkonzepte Montageassistent

Tabelle 23: Konfigurierte Anlagenkonzepte - Teil 2

| Lösung | Komponenten   | Prozesse  | KNV<br>(normiert) | Zykluszeit<br>(s) |
|--------|---|---|-------------------|-------------------|
| 7      | Mitarbeiter (manuell)<br>Manipulator hinterer Innenraum (manuell)<br>UR10e<br>Kamera<br>Federgespanntes Nachführen<br>Apex Cobotspindel 61 mit Aufsatz N10                    | Gurthöhenversteller B-Säule links<br>Gurtstraffer B-Säule links<br>Gurtbandführung B-Säule links<br>Gurtstraffer C-Säule links  | 0,69              | 42,4              |
| 8      | Mitarbeiter (manuell)<br>Manipulator hinterer Innenraum (manuell)<br>UR10e<br>Kamera<br>Federgespanntes Nachführen<br>Apex Cobotspindel 61 mit Aufsatz N10                    | Gurthöhenversteller B-Säule rechts<br>Gurtstraffer B-Säule rechts<br>Gurtbandführung B-Säule rechts<br>Gurtstraffer C-Säule rechts  | 0,69              | 42,4              |
| 9      | Mitarbeiter (manuell)<br>Manipulator vorderer Innenraum (manuell)<br>UR10e<br>Keine Kamera<br>Federgespanntes Nachführen<br>Apex Cobotspindel 38 mit Aufsatz SW10             | Airbagsteuergerät schrauben 1<br>Airbagsteuergerät schrauben 2<br>Airbagsteuergerät schrauben 3<br>Massemutter Innenraum lösen 1  | 0,75              | 14,84             |
| 10     | Mitarbeiter (manuell)<br>Verfahrwagen + Manipulator Vorderwagen (manuell)<br>UR10e<br>Keine Kamera<br>Federgespanntes Nachführen<br>Apex Cobotspindel 38 mit Aufsatz SW10     | Massemutter Motorraum schrauben 1<br>Massemutter Motorraum schrauben 2<br>Massemutter Motorraum schrauben 3<br>Massemutter Motorraum schrauben 4<br>Massemutter Motorraum schrauben 5 | 0,46              | 46,6              |
| 11     | Mitarbeiter (manuell)<br>Manipulator vorderer Innenraum mit Ausleger (manuell)<br>UR5e<br>Keine Kamera<br>Federgespanntes Nachführen<br>Apex Cobotspindel 38 mit Aufsatz SW10 | Massemutter Innenraum schrauben 1<br>Massemutter Innenraum schrauben 2<br>Massemutter Innenraum schrauben 4<br>Massemutter Innenraum schrauben 5                                      | 0,55              | 42,0              |
| 12     | Mitarbeiter (manuell)<br>Manipulator Vorderwagen (manuell)<br>UR10e<br>Kamera<br>Sensitives Nachführen<br>Flachabtrieb mit Aufsatz SW11                                       | Bremsdruckleitung 1<br>Bremsdruckleitung 2<br>Bremsdruckleitung 3<br>Bremsdruckleitung 4<br>Bremsdruckleitung 5<br>Bremsdruckleitung 6  | 0,49              | 52,1              |
| 13     | Mitarbeiter (manuell)<br>Manipulator Hinterwagen (manuell)<br>UR10e<br>Kraft-Momenten-Sensor (Taktile)<br>Sensitives Nachführen<br>Apex Cobotspindel 38 mit Aufsatz T30       | Lagerbock/ Gasdruckfeder HKL links 1<br>Lagerbock/ Gasdruckfeder HKL links 2<br>Lagerbock/ Gasdruckfeder HKL rechts 1<br>Lagerbock/ Gasdruckfeder HKL rechts 2                        | 0,75              | 42,2              |

## Anhang 11: Weitere Anlagenkonzepte Montageassistent

Tabelle 24: Anlagenkonzepte - Teil 3

| Lösung | Komponenten  | Prozesse   | KNV<br>(normiert) | Zykluszeit<br>(s) |
|--------|--|--|-------------------|-------------------|
| 14     | Mitarbeiter (manuell)<br>Verfahrwagen + Manipulator Seite (manuell)<br>UR10e<br>Positionskamera<br>Federgespanntes Nachführen<br>Schrauber mit Magazin<br>Vereinzel mit Magazinierungssystem       | Dachreling schrauben links 1<br>Dachreling schrauben links 2<br>Dachreling schrauben links 3<br>Dachreling schrauben links 4     | /                 | /                 |
| 15     | Mitarbeiter (manuell)<br>Verfahrwagen + Manipulator Seite (manuell)<br>UR10e<br>Positionskamera<br>Federgespanntes Nachführen<br>Schrauber mit Magazin<br>Vereinzel mit Magazinierungssystem       | Dachreling schrauben rechts 1<br>Dachreling schrauben rechts 2<br>Dachreling schrauben rechts 3<br>Dachreling schrauben rechts 4 | /                 | /                 |
| 16     | Mitarbeiter (manuell)<br>Verfahrwagen + Manipulator Hinterwagen (manuell)<br>iiwa14<br>Keine Kamera<br>Rollforming Werkzeug  | Rollforming Heckklappe   | /                 | /                 |
| 17     | Mitarbeiter (manuell)<br>Verfahrwagen + Manipulator Vorderwagen (manuell)<br>UR10e<br>Positionskamera<br>Federgespanntes Nachführen<br>Schrauber mit Magazin<br>Vereinzel mit Magazinierungssystem | Hutze Stirnwand schrauben 1<br>Hutze Stirnwand schrauben 2<br>Hutze Stirnwand schrauben 3<br>Hutze Stirnwand schrauben 4         | /                 | /                 |
| 18     | Mitarbeiter (manuell)<br>Verfahrwagen + Doppel-Manipulator Seite (manuell)<br>2x iiwa14<br>Keine Kamera<br>2x Rollforming Werkzeug   | Rollforming Türendichtung hinten links<br>Rollforming Türendichtung vorne links  | /                 | /                 |
| 19     | Mitarbeiter (manuell)<br>Verfahrwagen + Doppel-Manipulator Seite (manuell)<br>2x iiwa14<br>Keine Kamera<br>2x Rollforming Werkzeug   | Rollforming Türendichtung hinten rechts<br>Rollforming Türendichtung vorne rechts  | /                 | /                 |

## Anhang 12: Integrationskonzepte

Tabelle 25: Auswahl Montagestationen Montagelinienabschnitt 1

|                   | Bündelung 1      | Bündelung 2                  | Bündelung 3            | Bewertung<br>KNV<br>(normiert)   |
|-------------------|------------------|------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| <b>Variante 1</b> | Lösung:<br>1     | Lösung:<br>3, 14, 15, 16, 17 | Lösung:<br>4, 9 18, 19 | 0,97                             |
| <b>Variante 2</b> | Lösung:<br>1     | Lösung:<br>3, 14, 15, 16     | Lösung:<br>4, 9 18, 19 | 0,82                             |
| <b>Variante 3</b> | Lösung:<br>1, 13 | Lösung:<br>3, 14, 15, 16     | Lösung:<br>4, 9 18, 19 | 0,78<br>+ 1 zusätzlicher<br>Takt |

Tabelle 26: Auswahl Montagestationen Montagelinienabschnitt 2

|                   | Bündelung 1   | Bündelung 2   | Bündelung 3         | Bündelung 4  | Bewertung<br>KNV<br>(normiert) |
|-------------------|---------------|---------------|---------------------|--------------|--------------------------------|
| <b>Variante 1</b> | Lösung:<br>12 | Lösung:<br>11 | Lösung:<br>7, 8, 10 | /            | 0,82                           |
| <b>Variante 2</b> | Lösung:<br>12 | Lösung:<br>11 | Lösung:<br>7, 8, 10 | Lösung:<br>2 | 1,00                           |

## Anhang 13: Mensch-Maschine Faktor

Tabelle 27: Integrationskonzepte Montagelinienabschnitt 1 und 2

| Integrationskonzept                            | Variante 1 | Variante 2 | Variante 3            | Variante 4 |
|--|------------|------------|-----------------------|------------|
| <b>Montageeinheit 1</b>                        | Lösung 3   | Lösung 3   | Lösung 3              | Lösung 3   |
|  | Lösung 14  | Lösung 14  | Lösung 14             | Lösung 14  |
|  | Lösung 15  | Lösung 15  | Lösung 15             | Lösung 15  |
|  | Lösung 16  | Lösung 16  | Lösung 16             | Lösung 16  |
|  | Lösung 17  | /          | /                     | /          |
| <b>Montageeinheit 2</b>                        | Lösung 4   | Lösung 4   | Lösung 4              | Lösung 4   |
|  | Lösung 9   | Lösung 9   | Lösung 9              | Lösung 9   |
|  | Lösung 18  | Lösung 18  | Lösung 18             | Lösung 18  |
|  | Lösung 19  | Lösung 19  | Lösung 19             | Lösung 19  |
| <b>Montageeinheit 3</b>                        | Lösung 7   | Lösung 7   | Lösung 7              | Lösung 7   |
|  | Lösung 8   | Lösung 8   | Lösung 8              | Lösung 8   |
|  | Lösung 10  | Lösung 10  | Lösung 10             | Lösung 10  |
| <b>Montageeinheit 4</b>                        | /          | /          | Lösung 1<br>Lösung 13 | /          |
| <b>Montagestation 1</b>                        | Lösung 1   | Lösung 1   | Lösung 12             | Lösung 1   |
| <b>Montagestation 2</b>                        | Lösung 12  | Lösung 12  | Lösung 11             | Lösung 12  |
| <b>Montagestation 3</b>                        | Lösung 11  | Lösung 11  |                       | Lösung 11  |
| <b>Montagestation 4</b>                        |            |            | /                     | Lösung 2   |
| <b>Zusätzliche Takte</b>                       | 0          | 0          | 1                     | 0          |
| <b>KNV Montagelinienabschnitt 1 (normiert)</b> | 0,97       | 0,85       | 0,78                  | 0,85       |
| <b>KNV Montagelinienabschnitt 2 (normiert)</b> | 0,82       | 0,82       | 0,82                  | 1,00       |

## Anhang 13: Mensch-Maschine Faktor

Tabelle 28: Mensch-Maschine Faktor Montageassistent

|   |  | Punkteskala |   |   |   |   |   |
|---|--|-------------|---|---|---|---|---|
|   |  | 0           | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <b>Mensch-Maschine Faktor Engineering</b>             | Datenqualität CAD-Daten                    |             |   |   |   |   | X |
|   | Datenqualität Dokumentation                |             |   |   |   |   | X |
|   | Datenqualität Software/ Programme          |             |   |   |   |   | X |
|   | Informationen & Wissen aus Tests & Betrieb |             |   |   | X |   |   |
| <b>Mensch-Maschine Faktor Nutzung/ Instandhaltung</b> | Bedienbarkeit & Ergonomie                  |             |   |   |   |   | X |
|   | Wartbarkeit                                |             |   |   |   | X |   |
|   | Anlagen-/ Prozessüberwachung               |             |   |   | X |   |   |
| <b>Gewichteter Mensch-Maschine Faktor</b>             |  | <b>4,17</b> |   |   |   |   |   |