

**Forschungsbericht
Institut für Automatisierungstechnik
und Softwaresysteme**

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich

Florian Biesinger

**Digitaler Zwilling zur automatisierten
Verbesserung der Datenqualität
für die Integrationsplanung im
Karosserierohbau**

Band 1/2022

Universität Stuttgart

Digitaler Zwilling zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau

An der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Florian Sebastian Biesinger
aus Ehingen (Donau)

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Alexander Verl

Tag der mündlichen Prüfung: 20.12.2021

Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme (IAS)
der Universität Stuttgart

2022

IAS-Forschungsberichte

Band 1/2022

Florian Biesinger

**Digitaler Zwilling zur automatisierten Verbesserung
der Datenqualität für die Integrationsplanung im
Karosserierohbau**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8454-2

ISSN 1610-4781

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während der Durchführung meines interdisziplinären und wissenschaftlichen Ausbildungsprogramms an der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) in enger Kooperation mit dem Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme (IAS) der Universität Stuttgart sowie mit dem Forschungspartner Mercedes-Benz AG aus Stuttgart. Durch diese spezielle Rahmenbedingung war es mir möglich, wissenschaftliche Konzepte, die an der GSaME und am IAS entwickelt wurden, direkt in der Mercedes-Benz Produktion im Werk Sindelfingen zu testen und zu evaluieren. Durch die Entwicklung der Methodik an einem Produktionssystem mit realen Daten ergaben sich viele Herausforderungen, die beispielsweise in einem Universitätslabor nicht vorzufinden gewesen wären. Zusätzlich eröffnete die Kooperation sowohl eine exzellente wissenschaftliche Ausbildung an der GSaME als auch den Zugang zu einem enormen Erfahrungsschatz aus der täglichen Praxis bei der Mercedes-Benz AG. In diesem Rahmen konnte anwendungsorientierte Grundlagenforschung zum Thema „Digitaler Zwilling zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für Integrationsplanungen im Karosserierohbau“ betrieben werden. Als Resultat dieser Forschung entstand die vorliegende Abhandlung.

An dieser Stelle möchte ich mich ganz besonders bei Herrn Professor Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich dem Leiter des IAS für die fortwährende Unterstützung, seine Ratschläge und Denkanstöße während der Durchführung meiner Promotion bedanken. Ebenso danke ich ihm für die Übernahme des Hauptberichts und die fachlichen Diskussionen, insbesondere zur Forschungsmethodik, die immer in richtungsweisenden Ergebnissen endeten. Herrn Professor Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Alexander Verl danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und sein Engagement bei der Übernahme des Mitberichtes. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Mitschang danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission. Ganz besonders herzlich möchte ich mich bei Herrn Hans-Friedrich Jacobi für die Feedbackgespräche und seine wertvolle Unterstützung während der Korrekturphase dieser Abhandlung sowie während des gesamten GSaME-Programmes bedanken. Zudem gilt mein Dank allen Wegbegleitern während des interdisziplinären und wissenschaftlichen Ausbildungsprogrammes der GSaME für den anregenden Austausch und das konstruktive Feedback in den Doktoranden-Kolloquien.

Ohne die Initiative des Unternehmens Mercedes-Benz AG wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Daher möchte ich mich bei Herrn Dr. Davis Meike, Herrn Dr. Benedikt Kraß und Herrn Kai Visel sowie dem gesamten ehemaligen Team „Digitale Fabrik Rohbau“ der Mercedes-Benz AG für die praxisrelevante Aufgabenstellung und die sehr gute Zusammenarbeit bedanken. Ein gebührender Dank gilt außerdem den Studentinnen und Studenten, die ich im Rahmen der Arbeit als Masteranden und Praktikanten betreut habe. Ein spezieller Dank möchte ich zudem an die Planungsabteilung des Karosserierohbaus der Mercedes-Benz AG richten. Nur durch die offene Kommunikation mit den Kollegen sowie die Objektivität bei der Umfrage zu den Herausforderungen bei der Integrationsplanung, war es möglich die Aufgabenstellung dieser Arbeit aus praktischer Sicht methodisch zu untermauern und zu bestätigen. Allen anderen, die in diesem Umfeld Team-, Abteilungs- und Centerübergreifend mit mir bei der Umsetzung und Evaluation der Methodik zusammenarbeiteten, gilt ebenfalls ein herzliches Dankeschön.

Meiner Familie, insbesondere meiner Frau Isabell, bin ich für ihre bedingungslose Unterstützung und ihr geduldiges Verständnis von Herzen dankbar. Großer Dank gebührt außerdem meinen Eltern Robert und Annegret für ihren Beistand und Rückhalt.

Ehingen (Donau), 07.01.2022

Florian Biesinger

Kurzinhalt

Der Digitale Zwilling ist eine neue Technologie, um den Herausforderungen bei der Digitalisierung von Prozessen zu begegnen. Ein großes Anwendungsfeld, das enorme Potenziale für den Digitalen Zwilling ausweist, ist die Automobilindustrie. Zunehmender Kostendruck sowie der Trend zu immer individuelleren Fahrzeugvarianten mit diametralen Antriebstechnologien führen in der Automobilproduktion zu einer verstärkten Fahrzeugintegration in existierende Produktionsanlagen. Innerhalb der Produktionsplanung avanciert damit die Planung der Integration neuer Fahrzeuge in ein bestehendes Produktionssystem, im Fachjargon der Planer als „Integrationsplanung“ bekannt zur Hauptaufgabe. Die Datenqualität, die aus einer Kombination von mangelnder Datenpflege der Bestandsdaten und einem fehlenden Prozess zur Datenrückführung resultiert, ist als Grundlage für die Integrationsplanung impraktikabel. Der heutige Lösungsansatz einer manuellen Bestandsaufnahme in einem komplexen Produktionssystem wie einem automobilen Karosserierohbau ist sehr zeitaufwendig, teuer und zudem fehleranfällig. Deshalb wird ein systematischer Ansatz zur Lösung des Problems der unzureichenden Datenqualität benötigt. Hierfür stellt diese Abhandlung einen Digitalen Zwilling zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau vor. Die Entwicklung der Methodik erfolgt nach dem Forschungsprozess des „Design Science Research“ und wird am Beispiel eines automobilen Karosserierohbaus validiert und evaluiert. Zur Schaffung von Transparenz bei der Integration von Fahrzeugen in bestehende Produktionsanlagen wird der Digitale Zwilling für die Anwendung bei der Integrationsplanung definiert. Mit der in dieser Abhandlung entwickelten wissenschaftlichen Systematik ist es möglich, den Planern relevante Informationen für die Integrationsplanung durch den Digitalen Zwilling zur Verfügung zu stellen. Die Methodik setzt sich aus vier Bausteinen zusammen, die verschiedene Methoden enthalten und im Rahmen dieser Arbeit zum Teil bereits patentiert worden sind. Zur Evaluierung der Methodik wird eine Fallstudie durchgeführt, die drei Szenarien umfasst. Das erste Szenario zeigt eine Steigerung der Datenqualität in der Metrik „Vollständigkeit“. Das zweite Szenario illustriert eine Verbesserung der Datenqualität hinsichtlich „Aktualität“. Das dritte Szenario verdeutlicht die Anwendung der entwickelten Methodik zur Sicherstellung von Transparenz im komplexen Karosserierohbau. Der in dieser Abhandlung entwickelte Digitale Zwilling liefert einen entscheidenden Beitrag zur Bewältigung der Herausforderung einer schlechten Datenqualität bei der Integrationsplanung.

Short Summary

The Digital Twin is a new technology to face the challenges in the digitization of processes. One major field of application that shows enormous potential for the Digital Twin is the automotive industry. Increasing cost pressure and the trend towards more individual vehicle variants with diametrically opposed drive technologies are leading to more vehicle integration into existing production lines in automotive production. Within production planning, the planning of vehicle integration into an existing production system, known as "integration planning" in planners' jargon, is thus advancing to become the main task. Data quality resulting from a combination of inadequate data maintenance of inventory data and a lack of a process for data feedback is impractical as a basis for integration planning. Current solution approaches such as a manual inventory are very time consuming, expensive and also prone to errors in a complex production system such as a body shop. Therefore, a systematic approach is needed to solve the problem of insufficient data quality. For this purpose, this thesis presents a digital twin for automated data quality improvement for integration planning in body-in-white production. The development of the methodology follows the research process of "Design Science Research" and is validated and evaluated on the example of an automotive Body-in-White production. To create transparency in the integration of vehicles into existing production systems, the Digital Twin is defined for use in integration planning. With the scientific system developed in this thesis, it is possible to provide planners with relevant information for integration planning through the Digital Twin. The methodology is composed of four building blocks containing different methods, some of which have already been patented as part of this work. To evaluate the methodology, a case study is conducted that includes three scenarios. The first scenario illustrates an increase in data quality in the "completeness" metric. The second scenario illustrates an improvement in data quality in terms of "timeliness". The third scenario illustrates the application of the developed methodology to ensure transparency in the complex body shop. The Digital Twin developed in this thesis provides a decisive contribution to overcoming the challenge of poor data quality in integration planning.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Kurzzinhalt	V
Short Summary	VII
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Abbildungsverzeichnis	XV
Tabellenverzeichnis	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation – automobiler Karosserierohbau	1
1.2 Problemstellung und Wissenslücke	3
1.3 Zielsetzung.....	7
1.4 Forschungsmethodik „Design Science Research“ und Aufbau der Arbeit.....	10
2 Stand der Wissenschaft und Technik	12
2.1 Digitaler Zwilling zur Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung	12
2.1.1 Digitaler Zwilling.....	12
2.1.2 Reflexion und Würdigung bestehender Lösungsansätze.....	13
2.1.3 Fazit zum Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich Digitaler Zwilling.....	18
2.2 Integrationsplanung im Karosserierohbau	20
2.2.1 Produktionsplanung im Karosserierohbau	21
2.2.2 Integrationsplanung entwickelt sich zur Hauptaufgabe bei der Produktionsplanung	24
2.3 Verbesserung der Datenqualität.....	27
2.4 Anforderungen an die Methodik sowie Forschungsfragen.....	28
3 Grundlagen des Digitalen Zwillings zur Verbesserung der Datenqualität im Karosserierohbau	31
3.1 Ansätze für eine Digitale Fabrik.....	31
3.2 Automatisierung im Karosserierohbau	34
3.3 Zwischenfazit zur Digitalen Fabrik und zur Automatisierung im Karosserierohbau.....	36
4 Konzeption – Digitaler Zwilling zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau	37

5	Detaillierung der Methodik zur Anwendung bei der Integrationsplanung	41
5.1	Definition relevanter Informationen	41
5.2	Schaffung einer Datenbasis	44
5.2.1	Auswahl und Extraktion aktueller Informationen aus dem Produktionssystem	45
5.2.2	Bestimmung geeigneter Bestandsdaten	49
5.3	Generierung der Ressourcenstruktur	50
5.3.1	Phase 1: Identifikation mechanischer Anlagenkomponenten	52
5.3.2	Phase 2: Prüfung der Aktualität von Bestandsdaten und regelbasierter Ansatz	52
5.3.3	Phase 3: Verknüpfung von Anlagenkomponenten mit der Planungsbibliothek	55
5.3.4	Phase 4: Hierarchische Anordnung der Ressourcen in ein Mengengerüst	55
5.4	Erweiterung der Ressourcenstruktur um Prozess- und Produktdaten	56
5.4.1	Automatisierte Generierung einer Stationsabfolge	57
5.4.2	Informationsgenerierung für Fahrzeugmodelle und -varianten	60
5.4.3	Zuordnung von Fügepunkten und Fahrzeugteilen	61
5.5	Zusammenfassende Darstellung der entwickelten Methodik	62
6	Umsetzung der Methodik anhand eines Demonstrators	65
6.1	Softwarearchitektur des realisierten Demonstrators	65
6.2	Informationsquellen	66
6.3	Visualisierung	67
6.4	Datentransfer in das Produktionsplanungssystem	69
7	Evaluierung der Methodik	72
7.1	Planung der Szenarien	73
7.1.1	Planung Szenario 1	75
7.1.2	Planung Szenario 2	77
7.1.3	Planung Szenario 3	78
7.2	Szenario 1 – Vollständigkeit relevanter Informationen des Digitaler Zwillings	78
7.2.1	Mengengerüst der Ressourcen	79
7.2.2	Stationsabfolge	83
7.2.3	Fahrzeugmodelle und -varianten	83
7.2.4	Fügepunkte und Fahrzeugteile	84
7.2.5	Evaluierung der Vollständigkeit des Digitalen Zwillings für Integrationsplanungen	85
7.3	Szenario 2 – Verbesserung der Datenqualität in der Metrik „Aktualität“	86
7.3.1	Quantitative Validierung der Aktualität des Planungsstandes	86
7.3.2	Qualitative Validierung der Aktualität des Planungsstandes	89
7.3.3	Evaluation zur Verbesserung der Datenqualität durch den Digitalen Zwilling	91
7.4	Szenario 3 – Transparenz im komplexen Karosserierohbau	92

7.4.1	Identifikation von Änderungen am Beispiel Mengengerüst der Ressourcen	92
7.4.2	Identifikation von Änderungen am Beispiel Schweißpunkte	93
7.5	Evaluation	94
7.5.1	Bewertung der Methodik	94
7.5.2	Einordnung der Ergebnisse in den literarischen und den anwendungsorientierten Kontext.	103
8	Zusammenfassung und Ausblick	107
	Glossar.....	112
	Literaturverzeichnis.....	116
	Anhang	133

Abkürzungsverzeichnis

3D	3-Dimensional (räumlich)
AG	Aktiengesellschaft
AML	AutomationML (Automation Markup Language)
ARENA2036	Active Research Environment for the Next Generation of Automobiles 2036
CAEX	Computer Aided Engineering eXchange
CPPS	Cyber-phisches Produktionssystem
CPS	Cyber-phisches System
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIP	Digitales Innovationsprojekt
DQ	Datenqualität
GSaME	Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering
IAS	Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme
IBM	International Business Machines Corporation
JSON	JavaScript Object Notation
MSB	Manufacturing Service Bus
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NoSQL	Not only SQL
OEM	Original Equipment Manufacturer
PPR	Produkt, Prozess und Ressource
PROFINET	Process Field Net
REC	Reference-Calculation
REST	Representational State Transfer
RFID	Radio-frequency identification
RPAS	Roboterprogrammanalysewerkzeug als ein Service
SOP	Start of Production
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SQL	Structured Query Language
TIA-Portal	Totally Integrated Automation Portal
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
XML	Extensible Markup Language

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Karosserierohbau in Anlehnung an (Walla 2015) und (Brockmeyer 2010).....	2
Abbildung 1-2: Ishikawa-Diagramm der Problemsituation.....	5
Abbildung 1-3: Digitaler Zwilling zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität als Aufsetzpunkt zur Integrationsplanung.....	6
Abbildung 1-4: Relevanz der Anlageninformationen für eine Integrationsplanung.....	7
Abbildung 1-5: Zu berücksichtigende und zu erfüllende Randbedingungen beim Methodendesign.....	8
Abbildung 1-6: Gliederung der Arbeit und angewandte Forschungsmethode „Design Science Research“ nach (Vaishnavi et al. 2019).....	11
Abbildung 2-1: Einordnung der Forschung in den Reifegradindex für Digitalisierung nach (Weyrich 2019).....	19
Abbildung 2-2: Übersicht der Aufgaben einer Produktionsplanung in der Automobilindustrie nach (Walla 2015).....	22
Abbildung 2-3: Integrationsplanung als Teil des Lebenszyklus eines Produktionssystems in Anlehnung an (Walla und Kiefer 2011) und (Kiefer et al. 2018).....	26
Abbildung 2-4: Dimensionen der Datenqualität in Anlehnung an (Rohweder et al. 2018).....	28
Abbildung 3-1: Fokus der Digitalen Fabrik im Strahlenkreuz der Unternehmensprozesse (VDI-Richtlinie VDI 4499).....	31
Abbildung 3-2: Reduktion von Konvertern durch die Verwendung von AutomationML in Anlehnung an (Draht 2010, S. 5).....	33
Abbildung 3-3: Auflösung der hierarchischen Automatisierungspyramide durch das CPS (Bettenhausen und Kowalewski 2013, S. 6).....	34
Abbildung 3-4: Integrationstechnologie - MSB (Burger et al. 2017, S. 63).....	36
Abbildung 4-1: Methodik des Digitalen Zwillings zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau.....	38
Abbildung 5-1: Festlegung der Anwendung des Digitalen Zwillings.....	43
Abbildung 5-2: Ansätze zur Extraktion von Informationen aus dem Karosserierohbau.....	45
Abbildung 5-3: Informationen aus unterschiedlichen Offlinekonfigurationen.....	47
Abbildung 5-4: Methode zur automatischen Erstellung eines Mengengerüsts der Ressourcen.....	51
Abbildung 5-5: Teilmenge mechanischer Anlagenkomponenten.....	52
Abbildung 5-6: Identifikation von Änderungen zwischen Produktionssystem und Bestandsdaten.....	53
Abbildung 5-7: Vereinfachte exemplarische Darstellung des regelbasierten Ansatzes.....	54
Abbildung 5-8: Ableitung einer Ressourcenstruktur aus den Komponenteninformationen.....	56
Abbildung 5-9: Erweiterung um relevante Produkt- und Prozessinformationen.....	56

Abbildung 5-10: Vereinfachte Darstellung der Fertigungsabfolge einer Produktionsanlage.....	57
Abbildung 5-11: Prinzip zur Generierung der Stationsabfolge	59
Abbildung 5-12: Identifikation von Fahrzeugmodell und -variante	60
Abbildung 5-13: PPR-Konzept am Beispiel des Robotermoduls - Widerstandspunktschweißen.....	61
Abbildung 5-14: Struktur der Methodik	63
Abbildung 6-1: Strukturüberblick des realisierten Demonstrators	65
Abbildung 6-2: Informationsquellen des Demonstrators.....	67
Abbildung 6-3: Visualisierung des Digitalen Zwillings für Integrationsplanungen.....	68
Abbildung 6-4: Demonstration AML-Export	70
Abbildung 6-5: Import Mengengerüst der Ressourcen ins Planungssystem „DELMIA“	71
Abbildung 7-1: Erstellungsprozess einer Fallstudie in Anlehnung an (Albers 2007)	72
Abbildung 7-2: Planung der Szenarien	74
Abbildung 7-3: Einfluss unterschiedlicher Methodenteile auf die Vollständigkeit.....	75
Abbildung 7-4: Änderungen im Anlagenlebenszyklus	78
Abbildung 7-5: Auswertung automatisch erzeugte Anlagenstruktur - Produktionsanlage 1.....	79
Abbildung 7-6: Auswertung der Stationsabfolge in Produktionsanlage 3.....	83
Abbildung 7-7: Validierung der Fahrzeugmodelle und -varianten.....	84
Abbildung 7-8: Auswertung der Vollständigkeit von Fügepunkten und Fahrzeugteilen	85
Abbildung 7-9: Auswertung der Abweichung vom Planungsstand hinsichtlich Stationen	87
Abbildung 7-10: Quantitative Auswertung der Abweichung von Ressourcen im Planungsstand	88
Abbildung 7-11: Ergebnis qualitative Auswertung nach geplanten Anlagenkomponenten	90
Abbildung 7-12: Qualitative Auswertung der Anlagenkomponenten Produktionsanlage 2.....	91
Abbildung 7-13: Änderungen im Mengengerüst der Ressourcen.....	93
Abbildung 7-14: Optimierungen am Beispiel Schweißpunkte	94
Abbildung 7-15: Übersicht der durchgeführten Verifikation und Validierung an einer vereinfachten Darstellung der Methodik	95
Abbildung 7-16: Einordnung der Ergebnisse in den Reifegradindex für Digitalisierung in Anlehnung an (Weyrich 2019)	104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Bewertung bestehender wissenschaftlicher Lösungsansätze.....	15
Tabelle 5-1: Bewertung der derzeitigen Informationsquellen im Karosserierohbau.....	48
Tabelle 5-2: Bewertungsschema für Bestandsdaten im Karosserierohbau als Informationsquelle.....	50
Tabelle 7-1: Szenarien zur Validierung von einzelnen Methodenteilen.....	76
Tabelle 7-2: Auswertung der relevanten Anlagenkomponenten für eine Planung.....	80
Tabelle 7-3: Auswertung der Szenarien 1a bis 1h.....	81
Tabelle 7-4: Auswertung der Anlagenstruktur Produktionsanlage 2.....	89
Tabelle 7-5: Auswertung der Anlagenstruktur Produktionsanlage 3.....	89
Tabelle 7-6: Design Science Research Grid dieser Abhandlung.....	106

1 Einleitung

Der Digitale Zwilling ist eine neue Technologie, um den Herausforderungen bei der Digitalisierung von Prozessen zu begegnen. Ein großes Anwendungsfeld, das enormes Verbesserungspotenzial durch den Digitalen Zwilling ausweist, ist die Automobilindustrie. Diese steht aktuell vor den gewaltigen Herausforderungen, einerseits die Fahrzeugangebote hinsichtlich CO² neutraler Antriebstechnologien (Batterie und Brennstoffzelle) zu erhöhen und andererseits die Produktionskosten pro Fahrzeug erheblich senken zu müssen. Bei den derzeit verbreiteten Produktionsnetzwerken ist bei Beachtung der jeweiligen Randbedingungen festzuhalten, dass mit den bestehenden Produktionssystemen eine große Anzahl an neuen Fahrzeugmodellen mit unterschiedlicher Fahrzeugarchitektur in kurzen Zeitintervallen produziert werden müssen. Teilweise veräußern Automobilhersteller einzelne Produktionsstätten, um die Effizienz im Produktionsnetzwerk erhalten bzw. erhöhen zu können (Prawitz 2020). Dadurch rückt die Fahrzeugintegration in eine bestehende Produktion sowie die dafür notwendige Planung als zentraler Stellhebel zur Kostensenkung in den Mittelpunkt.

1.1 Ausgangssituation – automobiler Karosserierohbau

Ein Automobilhersteller, häufig auch als sogenannter Automobil „OEM“ (Original Equipment Manufacturer) bezeichnet (Hundertmark 2013, S. 1), besitzt in der Regel eine eigene Produktion. Die Automobilproduktion lässt sich aktuell in die Gewerke „Presswerk“, „Karosserierohbau“, „Lackierung“ und „Montage“ strukturieren (siehe Abbildung 1-1). In dieser Arbeit erfolgt die Fokussierung auf das Gewerk „Karosserierohbau“, weil es die größte Eigenleistungstiefe der Wertschöpfungskette aufweist und zugleich das kostenintensivste Gewerk innerhalb der Automobilproduktion ist (Wemhöner 2005, S. 42). Die Rohkarosse bestimmt das Erscheinungsbild eines Automobils und stellt deshalb bei fast allen OEMs eine Kernkompetenz dar (ebd., S. 43). Der Karosserierohbau kann heute als ein großes Robotersystem charakterisiert werden, das hauptsächlich aus Robotern, aber auch weiteren Komponenten wie beispielsweise Haltevorrichtungen und Werkzeugen der Roboter besteht (Dietz et al. 2013, S. 1). In den letzten Jahren wurde jährlich ein neuer weltweiter Verkaufsrekord für Industrieroboter erzielt (Verl et al. 2019, S. 799). Durch Präzision, Gleichmäßigkeit und eine geringe Fehleranfälligkeit bei der Fertigung sowie weiteren monetären Einsparungen macht sich der Einsatz von Industrierobotern im Karosserierohbau bezahlt (Hänisch 2017, S. 19). Der Karosserierohbau weist daher einen extrem hohen Automatisierungsgrad

auf (Wemhöner 2005), (Lambertz 2009). Abbildung 1-1 zeigt die Einordnung des Gewerks „Karosserierohbau“ in die gesamte Automobilproduktion. Zusätzlich werden in der Grafik die typischen drei Zusammenbaustufen, Unterbau (Z1), Aufbau (Z2) und Anbauteile (Z3) eines Karosserierohbaus abgebildet. Die Zusammenbaustufen sind in einzelne Produktionsbereiche

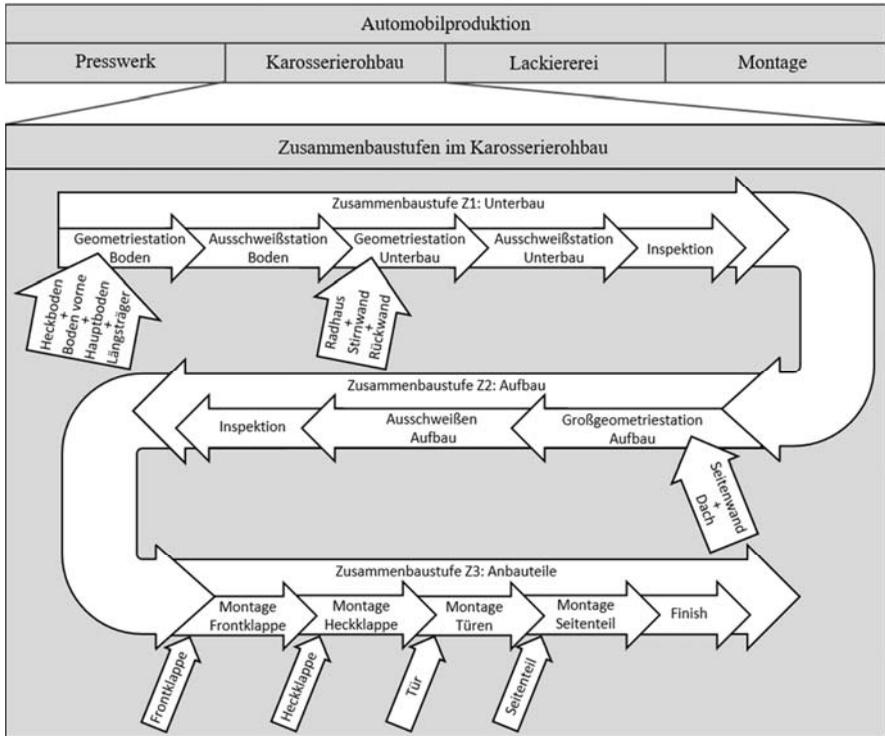


Abbildung 1-1: Karosserierohbau in Anlehnung an (Walla 2015) und (Brockmeyer 2010)

gegliedert. Zu einem Produktionsbereich gehören mehrere Produktionsanlagen, die sich wiederum in zahlreiche Stationen mit verschiedenen Arbeitsinhalten strukturieren lassen. Als Fertigungsverfahren werden im Karosserierohbau maßgeblich Fügeverfahren eingesetzt (DIN 8580: 2020-01), um verschiedene Teile einer Fahrzeugkarosserie auf Dauer zu verbinden zu können (DIN 8593-0: 2003-09). Das dominierende Fügeverfahren im Karosserierohbau ist das Widerstandspunktschweißen (Wemhöner 2005, S. 40), (Osterwinter 1992, S. 4). Darüber hinaus weisen zahlreiche Industrieroboter Handhabungsfunktionen auf (Karim et al. 2018, S. 1), (VDI-Richtlinie 2861). Diese werden im Folgenden auch als Handling-Roboter bezeichnet. Handling-Roboter bewegen Fahrzeugkarosserien

zwischen den Fertigungsstationen im Karosserierohbau (Hagemann und Stark 2018). Ebenso übernehmen Roboter Prozessschritte wie automatische Messungen und Qualitätsprüfungen (Dinse 2015, S. 107). Neue Produkte, Technologien, Normen und produktionsrelevanten Vorschriften sowie sich ändernde Anforderungen sind jedoch häufig Auslöser für Änderungen in einem Fertigungssystem (Weyrich et al. 2014, S. 3451), (Marks et al. 2017, S. 2). Insbesondere die unterschiedliche Fahrzeugarchitektur der Rohkarosse von Elektrofahrzeugen gegenüber herkömmlichen Verbrennern führt zu neuen Anforderungen an den bestehenden Karosserierohbau. Während des Anlagenlebenszyklus kommt es daher zwangsläufig zu Änderungen an bestehenden Produktionsanlagen (Westkämper und Löffler 2016), (Weyrich et al. 2014), (Bracht et al. 2011), (Walla und Kiefer 2011), (Hoang et al. 2018), (Vogel-Heuser et al. 2015). Infolge dieser Veränderungen entwickelt sich die Planung als eine permanente Aufgabe verschiedener Fachleute und Disziplinen (Pawellek 2014, S. 11). Insbesondere rückt die Planung der Integration neuer Fahrzeuge in ein bestehendes Produktionssystem, in der Fachsprache der Planer als „Integrationsplanung“ bekannt, als Hauptaufgabe innerhalb der Produktionsplanung in den Mittelpunkt.

1.2 Problemstellung und Wissenslücke

Bei der Realisierung eines Produktionssystems werden während der Planung und des Engineerings derzeit etliche individuelle Werkzeuge und Softwaresysteme eingesetzt. Dementsprechend kommt es zu zahlreichen verschiedenen Repräsentationsformen des Produktionssystems (Schindler 2019). Die Vielfältigkeit dieser Teilmodelle des Produktionssystems aus unterschiedlichen Perspektiven erzeugen Medienbrüche und torpedieren oft die erforderliche Ganzheitlichkeit einer Planung (ebd., S.3). Darüber hinaus kommt aufgrund des Kostendrucks in den einzelnen Bereichen heute kaum eine Methode zur Datenpflege von Bestandsdaten zum Einsatz. Es fehlt des Weiteren ein definierter Prozess zur Datenpflege selbst. Die derzeitige Vorgehensweise ist fehleranfällig und kostenintensiv. Selbst wenn Mitarbeitern vor Ort, wie beispielsweise Instandhalter, die Änderungen am Produktionssystem unmittelbar wahrnehmen, fehlt ihnen jedoch die notwendige Software sowie die Softwarekenntnisse zur Aktualisierung der Bestandsdaten (Helbig et al. 2016). Insgesamt bewirken diese Randbedingungen als Folge eine **schlechte Datenqualität und Intransparenz** bei den Bestandsdaten. Zur **Integrationsplanung** benötigen Produktionsplaner **aktuelle und vollständige Informationen** zum existierenden Produktionssystem, die im Weiteren näher erläutert werden. Eine wesentliche Datenbasis zur Integration eines neuen Fahrzeugs in die bestehende Produktionsanlage ist ein aktuelles „**Mengengerüst der Ressourcen**“ (Breckle et al. 2019, S. 254), (Kiefer et al. 2018,

S. 802), (Michalos et al. 2015, S. 71). Das Mengengerüst der Ressourcen enthält Informationen über die vorhandenen Roboter, Fertigungstechnologien, Stationen und über die Struktur des Produktionssystems (Hagemann und Stark 2020, S. 2). Die zu unterstützenden Fertigungsverfahren und die einzelnen Ressourcen der Fertigungslinie sind hier in einer hierarchischen Planungsstruktur gebündelt (Stanev 2012). Das Mengengerüst der Ressourcen ist damit die entscheidende Grundlage für Berechnungen und Abschätzungen, ob weitere Ressourcen für die Fahrzeugintegration in das bestehende Produktionssystem benötigt werden. Zur Optimierung der Fahrzeugintegration hinsichtlich des Materialflusses, der Ressourcennutzung und Logistik benötigt der Planer die aktuelle „**Stationsabfolge**“ des existierenden Produktionssystems (Michalos et al. 2015, S. 70). Die Stationsabfolge, die die wesentlichen Informationen über den Produktfluss, die Fertigungssequenz und die Fertigungsreihenfolge beinhaltet, ist eine fundamentale Information für einen Planer (Hagemann und Stark 2020, S. 3), (Stanev 2012). Häufig wird ein Karosserierohbau so konzipiert, dass mehrere Fahrzeugmodelle verarbeitet werden können, wodurch dieser viele verschiedene Fertigungseigenschaften aufweist (Michels et al. 2018, S. 329). Ein Planer vergleicht deshalb das neu einzuschleusende Fahrzeug mit allen bereits vorhandenen Fahrzeugvarianten und analysiert die Unterschiede. Dies ist in der Regel mit einem hohen Zeitaufwand verbunden (Hagemann et al. 2019, S. 161). Der Vergleich ermöglicht dem Planer jedoch eine Ableitung, ob gegebenenfalls zusätzliche Fertigungsverfahren und weitere Ressourcen in den bestehenden Produktionsprozess zur Fertigung des neuen Fahrzeugs erforderlich sind. Die Information über die aktuell gefertigten „**Produktvarianten**“ ist für den Planer deshalb direkt ergebniswirksam (Hagemann und Stark 2020, S. 2). Ebenso muss der Planer die **Anzahl der Fügepunkte**, die von einer Ressource gefügt werden, mit beachten (Hagemann und Stark 2020, S. 6), (Michalos et al. 2015, S. 69), (Walla 2015), (Burr 2008). Denn davon kann ein Planer abschätzen, ob die für eine neue Fahrzeugvariante zu implementierenden Fügepunkte durch die bestehenden Ressourcen abgedeckt werden können. Für die Integrationsplanung werden auch stationsbezogene die Information benötigt, um auszumachen, wo im Produktionssystem die einzelnen Fahrzeugteile zusammengefügt und durch welche Ressource diese dort zu bearbeiten sind. Eine wertvolle Information für die Integrationsplanung ist zusätzlich die Zuordnung, in welcher Fertigungsstation und durch welche Ressource die einzelnen **Fahrzeugteile zusammengebaut** werden (Walla 2015), (Stanev 2012). Die Aufschlüsselung der Fahrzeugteile zur bearbeitenden Ressource ermöglicht es einem Planer, zu erkennen, in welcher Reihenfolge die Fügefolge eines Fahrzeugs durch die Produktionsanlage umgesetzt wird (Hagemann und Stark 2020, S. 3).

Wenn eine der oben aufgeführten Informationen fehlt oder intransparent ist, erfolgt eine suboptimale Integrationsplanung.

Diese Problemsituation ist in einem Ishikawa-Diagramm in Abbildung 1-2 beleuchtet. Das Fehlen

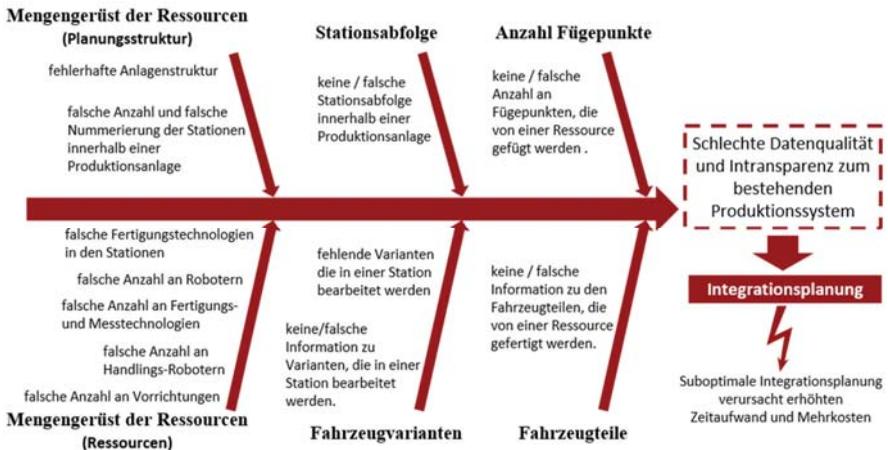


Abbildung 1-2: Ishikawa-Diagramm der Problemsituation

einer relevanten Information führt in der Regel zur Kostensteigerung als Folge einer geringeren Effizienz und Verfügbarkeit des Produktionssystems (Hagemann und Stark 2020, S. 1), (Kiefer et al. 2017, S. 447). Ohne das Mengengerüst der Ressourcen kann beispielsweise keine Berechnung der Produktionskosten, Investitionskosten und Kapazitätsauslastung sowie des Energieverbrauchs erfolgen (Breckle et al. 2019, S. 254), (Michalos et al. 2015, S. 70), (Michels et al. 2018, S. 320). Gleichzeitig bildet das Mengengerüst der Ressourcen die Basis für die gesamte Integrationsplanung. Ohne eine aktuelle Stationsabfolge des Produktionssystems können der Materialfluss, die Ressourcennutzung und die Logistik für das neue Fahrzeug nicht optimal geplant werden (Michalos et al. 2015, S. 70). Neben den oben genannten Kosten führt das Fehlen von mindestens einer relevanten Information zu einer längeren Planungsdauer und damit letztendlich auch zur Erhöhung der Kosten. Denn die oben beschriebenen Informationen sind insgesamt unerlässlich für eine wirtschaftliche Integrationsplanung. Produktionsplaner verbringen heute den Großteil ihrer Arbeitszeit mit der Informationsbeschaffung, Analyse und Aufbereitung von relevanten Daten (Hagemann und Stark 2020, S. 1), (Bracht et al. 2011, S. 60). Fehlt eine der benötigten Informationen zur Produktionsanlage, muss der Planer diese zeitaufwendig beschaffen, wodurch ihm wiederum Zeit für die zweifelsohne unentbehrliche gestaltende und bewertende Tätigkeiten fehlt (Bracht et al. 2011,

S. 60). Hier setzt diese Arbeit an, indem ein automatisierter Digitaler Zwilling alle relevanten Informationen in einer geeigneten Datenqualität bereitstellt und als Aufsetzpunkt zur Integrationsplanung dient. Dieser Ist- und Soll-Zustand ist in Abbildung 1-3 zusammengefasst. Eine

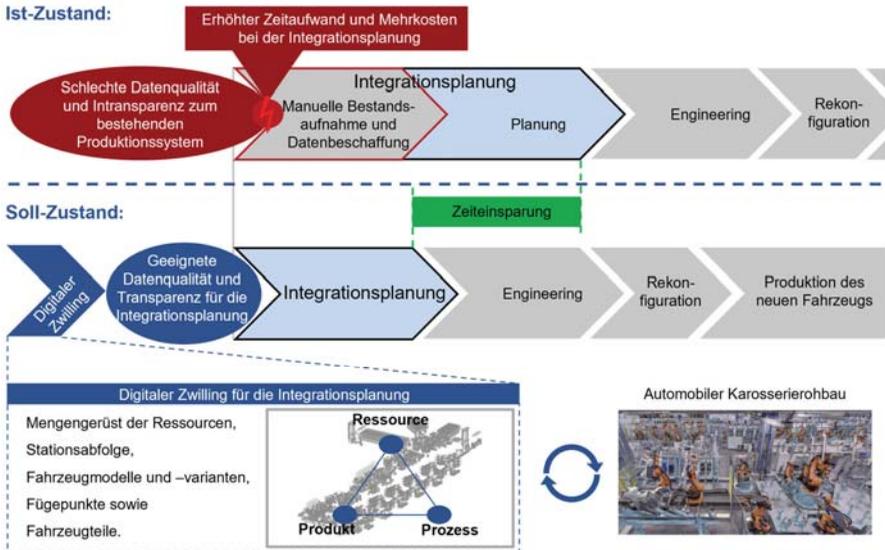


Abbildung 1-3: Digitaler Zwilling zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität als Aufsetzpunkt zur Integrationsplanung

Expertenbefragung bei einem internationalen Automobilunternehmen bestätigt die Aktualität der Problemsituation. In der Umfrage bewerteten 22 Planer und Führungskräfte aus der Planung die Herausforderungen bei der Integrationsplanung (Biesinger et al. 2019a). Gemäß der Befragung nimmt die Komplexität bei Integrationsplanungen durch die unterschiedlichen Fahrzeugarchitekturen zwischen Elektrofahrzeugen und Verbrennern deutlich zu. Zusätzlich zeigt die Umfrage auch, dass die obsoleten Planungsstände und mangelnde Transparenz hinsichtlich der Aktualität der Anlageninformationen heute eine immense Herausforderung bei einer Integrationsplanung darstellen. In Abbildung 1-4 wird die Einschätzung der Produktionsplaner bezüglich der oben beschriebenen Schlüsselinformationen anhand des Kriteriums *Relevanz* wiedergegeben. Die Planungsexperten bestätigten damit, dass diese Schlüsselinformationen eine notwendige Basis für die Integrationsplanung aus Sicht einer OEM-Planungsabteilung darstellen, unabhängig von entsprechenden Literaturhinweisen. Darüber hinaus gehen aus der Befragung noch die Kriterien *Taktzeit* und *Layout* als zwei weitere relevante Informationen für die Integrationsplanung hervor. Zu

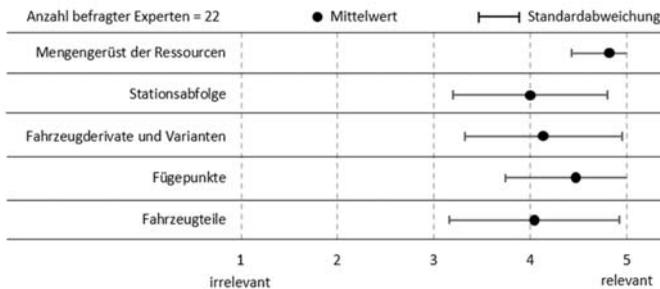


Abbildung 1-4: Relevanz der Anlageninformationen für eine Integrationsplanung

den hier inhärenten Informationsproblemen liegen aktuell jedoch bereits zahlreiche wissenschaftliche und praktische Lösungen vor. Zum einen werden die Anlagen-Positionen im Layout immer häufiger mithilfe von 3D-Punktwolken aktualisiert, die direkt in moderne Planungswerkzeuge hinein geladen werden (Biesinger et al. 2018b), (Schindler 2019). Zum anderen liegt bereits ein Konzept zur automatischen Positionierung des digitalen Layouts durch Roboterinformationen vor (Braun et al. 2021). Ebenso existieren bereits Softwarewerkzeuge, die aktuelle Taktzeiten von Produktionsanlagen enthalten und visualisieren, wie zum Beispiel das „Integra-Portal“ bei einem OEM. Zusätzlich wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Konzept zur Bestimmung von Ist-Prozesszeiten für Roboterprozesse mitentwickelt, das bereits Anwendung in der Produktion eines Automobilherstellers findet (Biesinger et al. 2019c). Als Fazit ist zusammenfassend festzuhalten, dass die schlechte Datenqualität und die intransparenten Prozesse des bestehenden Produktionssystems die Integrationsplanung erschweren, wodurch ein erhöhter Zeitaufwand und Mehrkosten entstehen. Ebenfalls bestätigt die Expertenbefragung in der Automobilindustrie, dass bisher das Wissen zum vollständigen und automatisierten Erwerb folgender, ständig aktuell zu haltenden Daten fehlt (Wissenslücke): Mengengerüst der Ressourcen, Stationsabfolge, Fahrzeugmodelle und -varianten, zu bearbeitende Fügepunkte sowie Fahrzeugteile.

1.3 Zielsetzung

Bei der Entwicklung der Methodik sind mit Blick auf den industriellen Problembereich und der wissenschaftlichen Problembetrachtung drei Randbedingungen zu berücksichtigen. Diese drei wesentlichen Randbedingungen sind die „Aktualität und Vollständigkeit relevanter Informationen“,

ein „automatisierter Ablauf“ der Methodik sowie die „Skalierung auf ein komplexes Produktionssystem“ (siehe Abbildung 1-5).



Abbildung 1-5: Zu berücksichtigende und zu erfüllende Randbedingungen beim Methodendesign

Randbedingung 1: Aktualität und Vollständigkeit relevanter Informationen

Durch die mangelnde Pflege von Bestandsdaten bei den Änderungen innerhalb des Karosserierohbaus kommt es derzeit zur Intransparenz hinsichtlich der Aktualität und Vollständigkeit relevanter Informationen. Gemäß der Problemstellung werden in Abbildung 1-5 die relevanten Informationen für die Integrationsplanung dargestellt, für deren aktuelle und vollständige Abbildung bisher keine systematische Lösung existiert. Ein aktuelles Mengengerüst der Ressourcen stellt in diesem Kontext eine fundamentale Informationsbasis zur Integrationsplanung dar. Das Mengengerüst der Ressourcen umfasst die Struktur der Produktionsanlage sowie alle darin enthaltenen Ressourcen des Karosserierohbaus. Diese Anlagenressourcen sollen dabei bis hinunter auf die Sensorebene abgebildet werden, sodass beispielsweise jede Vorrichtung die exakte Anzahl an Spannern enthält. Eine weitere obligatorische Information stellt die Stationsabfolge dar. Zusätzlich werden Informationen über die Fahrzeugmodelle und -varianten benötigt, die an den einzelnen Fertigungsstationen bearbeitet werden. Weitere signifikante Informationen betreffen die Anzahl der Fügepunkte, die von einem Roboter zu einem jeweiligen Fahrzeug angesteuert und bearbeitet werden müssen. Bedeutende Details sind beim Schweißen beispielsweise, ob es sich um einen Geopunkt zur Fixierung der Fahrzeugkarosserie oder um einen Ausschweißpunkt handelt. Ebenso unentbehrlich ist die Auskunft über die jeweiligen Fahrzeugteile, die an einer Fertigungsstation bearbeitet werden

sollen. Diese Informationen sollen zukünftig durch einen Digitalen Zwilling für die Integrationsplanung aktuell und vollständig abgebildet werden.

Randbedingung 2: Automatisierter Ablauf

Aufgrund der beachtlichen Größe der Produktionssysteme in der Automobilindustrie ist eine manuelle Bestandsaufnahme der aktuellen Informationen sehr zeitaufwendig und kostenintensiv. Eine weitere Randbedingung an die Anwendbarkeit der Methodik ist deshalb deren automatisierter Ablauf. Der automatisierte Ablauf soll die Datenqualität des Karosserierohbaus möglichst vollautomatisch steigern und die laufende Produktion nicht negativ beeinflussen, sodass zu keinem Zeitpunkt das Risiko eines Anlagenstillstandes oder einer Störung im Karosserierohbau besteht.

Randbedingung 3 – Skalierung auf ein komplexes Produktionssystem

Die Komplexität in großen Fertigungslinien ist heute extrem hoch (Michalos et al. 2015, S. 69). Gemäß WEYRICH ET. AL. (Weyrich et al. 2017, S. 190) kann die Komplexität in einer Fertigung in mehreren Ausprägungen auftreten. In dieser Arbeit wird innerhalb des Karosserierohbaus zwischen der *Systemkomplexität* und der *digitalen Komplexität* unterschieden. Die *Systemkomplexität* in einem „Karosserierohbau“ basiert auf einer Vielfalt unterschiedlicher Anlagenkomponenten und Technologien, die auf verschiedene Weise miteinander zusammenhängen. So existiert in heutigen Fertigungssystemen eine große Vielfalt mit Hunderten von Subsystemen verschiedener Hersteller, die ihre Systeme wiederum aus Subsystemen anderer Hersteller zusammensetzen (Weyrich 2018a). Hierbei liegen unter anderem komplexe Abhängigkeiten in den Steuerungssystemen vor, die dem Anlagenbetreiber oftmals nicht bekannt sind (Zeller 2019). Dies führt zu einer extrem hohen Komplexität heutiger Fertigungssysteme, die kaum zu beherrschen ist (Weyrich 2018b). Die *digitale Komplexität* ergibt sich aus einer hohen Anzahl unterschiedlicher Daten sowie den Abhängigkeiten zwischen Daten in verschiedenen Datensätzen. Ein Karosserierohbau durchläuft während des Anlagenlebenszyklus verschiedene Phasen, in denen eine Fülle von unterschiedlichen Experten und individuellen Softwarewerkzeugen eingesetzt werden. Das Fehlen einer durchgängigen digitalen Prozesskette führt dazu, dass sich einzelne Datenmodelle als Dateninseln abbilden. Diese Bestandsdaten sind wiederum in verschiedenen Bereichen eines Unternehmens verstreut abgelegt. Die *digitale Komplexität* im Karosserierohbau wird des Weiteren durch die Kombination unterschiedlicher Repräsentationsformen des Produktionssystems gekennzeichnet, die zum einen miteinander zusammenhängen und die zum anderen im Datenformat ihrer Form und inhaltlichen Struktur nach voneinander abweichen (Draht 2010, S. 34). Für die praktische Anwendung des Digitalen Zwillings ist die Skalierung der Methodik auf das komplexe Produktionssystem

„Karosserierohbau“ mit weit mehr als hundert Roboter und mehr als tausend Anlagenkomponenten von entscheidender Bedeutung. VERL ET AL. (Verl et al. 2013, S. 682) bestätigen die Skalierbarkeit als einen zentralen Faktor innerhalb einer Produktion im 21. Jahrhundert. Somit ist die Skalierbarkeit der Methodik auf ein komplexes Produktionssystem ein wesentlicher Punkt für eine Anwendung der Methodik in der Praxis, um einen „Karosserierohbau“ transparent darzustellen.

Zusammengefasst ist die Zielsetzung dieser Dissertation:

Die Methodik eines Digitalen Zwillings zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau unter Berücksichtigung der Randbedingungen „Aktualität und Vollständigkeit relevanter Informationen“, „automatisierter Ablauf“ sowie „Skalierung auf ein komplexes Produktionssystem“.

Im Weiteren wird auf die dieser Arbeit zu Grunde liegenden Forschungsmethodik „Design Science Research“ eingegangen. Durch systematisches Vorgehen soll sichergestellt werden, dass die erarbeitete Lösung zur Erfüllung der Zielsetzung den wissenschaftlichen Ansprüchen gerecht wird.

1.4 Forschungsmethodik „Design Science Research“ und Aufbau der Arbeit

„Ergebnisse Digitaler Innovationsprojekte (DIP) sind zumeist neue Artefakte von Informationssystemen, die stark an die Resultate gestaltungsorientierter Forschung erinnern – dem sogenannten Design Science“ (Scheplitz et al. 2020, S. 257). Diese Dissertation orientiert sich insofern an der wissenschaftlichen Methodik „Design Science Research“ nach HEVNER (Hevner et al. 2004), als das die Struktur der Arbeit am „Design Science Research“-Forschungsprozessmodell von VAISHNAVI (Vaishnavi et al. 2019) ausgerichtet wird. Hierzu ist die Abhandlung in acht Kapitel gegliedert, siehe Abbildung 1-6. In der Einleitung wird auf Basis der Literatur und einer Umfrage bei einem internationalen Automobilunternehmen ein grundlegendes Problembewusstsein für die fehlende Transparenz bei einer Integrationsplanung geschaffen. In Kapitel 2 erfolgt die problembezogene Auseinandersetzung mit der Literatur. Dabei wird der Stand der Wissenschaft und Technik zur Integrationsplanung im Karosserierohbau bewertet, bestehende Lösungsansätze zum Thema „Digitalen Zwilling für die Integrationsplanung“ reflektiert sowie Defizite anhand einer Forschungslücke aufgezeigt. Die Ausführungen in Kapitel 3 sind grundlegend für diese Arbeit. Dazu zählen die Ansätze des Konzepts der „Digitalen Fabrik“ und der Automatisierung im Karosserierohbau. Die Konzeption der Methodik zur Problemlösung wird in Kapitel 4 vorgestellt. Eine Detaillierung der Vorgehensweise zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung erfolgt in Kapitel 5. Dabei werden die einzelnen Methodenbausteine, Definition

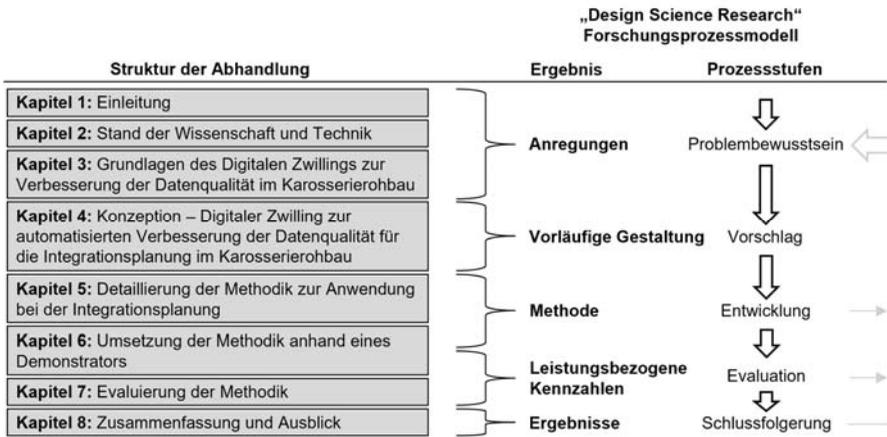


Abbildung 1-6: Gliederung der Arbeit und angewandte Forschungsmethode „Design Science Research“ nach (Vaishnavi et al. 2019)

der relevanten Informationen, Schaffung einer Datenbasis, Generierung der Ressourcenstruktur sowie die Erweiterung der Ressourcenstruktur um Prozess- und Produktinformationen erläutert. Kapitel 6 gibt einen Einblick in die Anwendung der entwickelten Methodik anhand eines Softwaredemonstrators. Die Validierung und Evaluierung der Methodik erfolgen in Kapitel 7. Hierbei wird der Softwaredemonstrator in einem realen Szenario in einem Automobilunternehmen zur Integrationsplanung eingesetzt. Anschließend werden in Kapitel 8 die vorangegangenen Kapitel zusammengefasst dargestellt und zusätzliche Handlungsempfehlungen in einem Ausblick erörtert.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich Digitaler Zwilling untersucht und die Forschungslücke dieser Arbeit aufgezeigt. Im Weiteren werden die Grundlagen zur Integrationsplanung im Karosserierohbau sowie zur Verbesserung der Datenqualität aufgezeigt. Die grundlegende Problematik, der diese Arbeit begegnet, ist eine mangelnde Datenqualität als Basis für eine Integrationsplanung, die aus einem fehlenden Prozess zur Datenrückführung resultiert. Deshalb wird in diesem Kapitel insbesondere der Prozess bei der Integrationsplanung im Karosserierohbau näher beleuchtet. Als Fazit aus dem Stand der Wissenschaft und Technik wird die Forschungsleitfrage dieser Arbeit definiert sowie die Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik zusammengefasst. Aus den Anforderungen leiten sich wiederum Teilfragen ab, die im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden.

2.1 Digitaler Zwilling zur Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen zum Digitalen Zwilling zusammengefasst dargestellt und der Stand der Wissenschaft und Technik hinsichtlich des Digitalen Zwillings für die Integrationsplanung reflektiert. Am Ende des Kapitels wird ein Fazit gezogen und die Forschungslücke aufgezeigt.

2.1.1 Digitaler Zwilling

Eine der ersten Definitionen eines „Digitalen Zwillings“ kommt von der National Aeronautics and Space Administration (NASA). Der Digitale Zwilling wurde 2010 von SHAFTO (Shafto et al. 2010) als „eine integrierte multiphysikalische, mehrskalige, probabilistische Simulation eines Fahrzeugs oder Systems beschrieben, das die besten verfügbaren physikalischen Modelle, Sensoraktualisierungen, Flottenhistorie usw. umfasst, um das Leben seines fliegenden Zwillings wiederzugeben“. Mittlerweile wurde das Konzept des Digitalen Zwillings auf Produktionsanlagen übertragen. Darüber hinaus existieren heute viele weitere Definitionen. NEGRI ET AL. (Negri et al. 2017) hatten in ihrem Literaturüberblick im Jahr 2017 bereits 16 verschiedene Definitionen zum Digitalen Zwilling präsentiert. Bei der Definition eines „Digitalen Zwillings“ existieren jedoch unterschiedliche Sichtweisen (Schleich et al. 2017, S. 142). Es gibt beispielsweise Wissenschaftler, die in dem Digitalen Zwilling „nur“ die digitale Repräsentation eines physischen Objekts sehen (Raj

und Surianarayanan 2019, S. 289). SANTILLAN MARTINEZ ET AL. definiert den „Digitalen Zwilling einer Produktionsanlage“ beispielsweise als „ein digitales Abbild der physischen Anlagen, das die Struktur und die Dynamik des Betriebs der Geräte und des Prozesses enthält.“ (Santillan Martinez et al. 2018a, S. 1). Für viele andere Wissenschaftler ist der Digitale Zwilling dagegen deutlich mehr als „nur“ das digitale Abbild der physischen Anlagen, nämlich ein Konzept, ein Modell oder eine Methodik (Riedel et al. 2020), (Rosen et al. 2015, S. 568), (Weyrich 2019), (Tao und Zhang 2017, S. 20418), (He und Bai 2020, S. 2), (Garrido und Sáez 2019). Nach CANEDO „bewegt sich die Digital Twin-Technologie in Richtung *der Erstellung einer digitalen Repräsentation* eines Objekts der realen Welt mit Fokus auf das Objekt selbst“ (Canedo 2016). Für Klostermeier et al. ist der Digitale Zwilling „mindestens das individuelle, virtuelle Abbild eines physischen Objektes oder Prozesses, welches die vom physischen Objekt bereitgestellten Daten intelligent für verschiedene Anwendungsfälle nutzbar macht“ (Klostermeier et al. 2019, S.3). Inzwischen haben sich außerdem weitere Begriffe wie der „Digitale Schatten“ in der Literatur etabliert (Schuh et al. 2016), (Bauernhansl et al. 2018). Verschiedene Forscher unterscheiden die Begriffe „Digitaler Schatten“, „Digitaler Zwilling“ und „digitales Abbild“ (Kritzinger et al. 2018), (Leskovsky et al. 2020). Im Folgenden wird der Argumentation von WAGNER (Wagner et al. 2017) gefolgt, nach dem der „Digitale Schatten“, „Digitale Engel“ und die „Virtuelle Einheit“ Synonyme für den „Digitalen Zwilling“ darstellen.

2.1.2 Reflexion und Würdigung bestehender Lösungsansätze

Die bestehenden Lösungsansätze zum Digitalen Zwilling sind hier hinsichtlich der Ausgangssituation, der Herausforderungen bezüglich der automatisierten Integrationsplanung, der Problemstellung sowie der Randbedingungen zu reflektieren. Die Literatur wird bei Beachtung einer automatisierten Verbesserung der Datenqualität für eine Integrationsplanung durch einen Digitalen Zwilling auf folgende Aspekte hin untersucht. Einerseits werden die *Inhalte* bekannter Konzepte zum Digitalen Zwilling für eine Planung, insbesondere für eine Integrationsplanung betrachtet. Im Vordergrund der Literaturanalyse stehen dabei die Bewertung der *Aktualität* und *Vollständigkeit* der Informationen, die der Digitale Zwilling für die Integrationsplanung bereitstellt. Andererseits wird die *Anwendbarkeit* der bestehenden Konzepte für den Digitalen Zwilling sowohl nach der Skalierung auf ein komplexes Produktionssystem (Karosserierohbau) als auch nach deren automatisierter Erstellung beurteilt.

Stand der Technik

Der Stand der Technik zum Digitalen Zwilling in der Fertigung wird maßgeblich durch das Patent von FISCHER UND HEINTEL (Fischer und Heintel 2015), (Fischer und Heintel 2016) und dem Patent

von HERSHEY ET. AL. (Hershey et al. 2016) geprägt. FISCHER UND HEINTEL (Fischer und Heintel 2015) beschreiben in ihrem Patent - „Prüfung einer Konsistenz zwischen Referenzdaten eines Fertigungsobjektes und Daten eines digitalen Zwillinges des Fertigungsobjektes“ - den Digitalen Zwilling eines Fertigungsobjektes. Dabei definieren sie den Digitalen Zwilling einer SPS in einer Fertigungszelle und ein Verfahren zur Prüfung der Datenkonsistenz. Zwar interagieren in einer einzelnen Fertigungszelle mehrere Anlagenkomponenten miteinander, die Komplexität ist aber nicht mit der in einem Produktionssystem eines automobilen Karosserierohbaus vergleichbar. Denn das Produktionssystem „Karosserierohbau“, besteht aus sehr vielen Fertigungszellen. Ebenso enthält dieses Patent weder eine automatisierte Erstellung des Digitalen Zwillinges noch den Aspekt Planung. Auch im Patent von HERSHEY ET AL. (Hershey et al. 2016), das sich auf die Zustandsüberwachung durch Sensorwerte mithilfe eines Digitalen Zwillinges fokussiert, werden die Aspekte „Komplexität in einem Produktionssystem“ und „automatisierte Erstellung“ auch nicht behandelt.

Wissenschaftliche Lösungsansätze

Besonders in der Wissenschaft nimmt die Anzahl an Publikationen mit neuen Konzepten und Methoden innerhalb der letzten Jahre zum Thema Digitaler Zwilling rapide zu. So gibt es in der Datenbank IEEE XPLORE (IEEE Xplore 29.01.2020) für das Jahr 2019, 84 und für das Jahr 2020, 153 neue Veröffentlichungen, die den Begriff „Digital Twin“ im Titel enthalten. Ein Digitaler Zwilling kann heute somit viele verschiedene Facetten abbilden (Biesinger und Weyrich 2019). Im Folgenden werden bestehende Konzepte und Methoden für die Entwicklung bzw. Anwendung eines Digitalen Zwillinges im Bereich der Produktion reflektiert. Tabelle 2-1 illustriert eine Übersicht aktueller Forschungsansätze zum Begriff „Digitaler Zwilling“ mit einer Bewertung im Hinblick auf den Problembereich und der wissenschaftlichen Problembetrachtung. UM (Um et al. 2017) entwickelte beispielsweise ein Datenmodell als Konzept des Digitalen Zwillinges auf der Grundlage von AutomationML. Er zeigt hierbei erstmals auf, wie sich ein Digitaler Zwilling automatisch durch die Verwendung seines Datenmodells und einer Kommunikationsschicht einrichten lässt. BARTHELMEY (Barthelme et al. 2019) bringt einen Digitalen Zwilling zur vorausschauenden Instandhaltung in der Montage hervor. Sein Konzept basiert auf einem Aktualisierungsdienst und einer Kennzeichnungsschnittstelle. Beide Konzepte ermöglichen nur eine geringfügig teilautomatisierte Erstellung eines Digitalen Zwillinges, jedoch keine automatisierte Erstellung, wie es Garrido und Sáez erklären. GARRIDO UND SÁEZ (Garrido und Sáez 2019) beschreiben eine Methode zur automatischen Generierung eines Digitalen Zwillinges für die Vorentwurfsphase einer Simulation bezüglich Lager- und Transportsysteme.

Tabelle 2-1: Bewertung bestehender wissenschaftlicher Lösungsansätze

Bestehende Methoden und Konzepte zum Forschungsbereich Digitaler Zwilling  = Stärke der Methode / des Konzeptes bezüglich des jeweiligen Merkmals	Digitaler Zwilling für die Planung (Automobilindustrie)	Automatisierte Erzeugung des Digitalen Zwillings	Skalierung auf ein komplexes Produktionssystem
Um (Um et al. 2017) – Konzept eines Datenmodells, das auf dem Datenformat AutomationML basiert.	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Barthelme y (Barthelme et al. 2019) – Konzept eines Aktualisierungsdienstes und einer Kennzeichnungsschnittstelle. Digitaler Zwilling für vorausschauende Instandhaltung in der Montage.	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Garrido (Garrido und Sáez 2019) – Methode zur automatischen Erstellung eines Digitalen Zwillings für die Vorentwurfphase einer Simulation am Beispiel eines Transport- und Lagersystems.	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Ashtari (Ashtari Talkhestani et al. 2017), (Ashtari Talkhestani et al. 2018a), (Ashtari Talkhestani et al. 2018b), (Ashtari Talkhestani et al. 2019) – Methode zum Abgleich von Steuerungsinformationen (XML) aus TIA-Portal und Identifikation von Änderungen. Ableitung von Zusammenhängen zwischen Software, Elektrik und Mechanik. Teilautomatische Synchronisierung des Digitalen Zwillings in Form einer Simulation.	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Zipper (Zipper et al. 2018), (Zipper und Diedrich 2019) – Synchronisation einer Simulation in der Engineering-Phase (virtuelle Inbetriebnahme) mit der Produktionsanlage. Die Methode verfolgt einen Online-Optimierungsansatz, um Unterschiede zwischen Anlage und Simulation auszugleichen.	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Haag und Anderl (Haag und Anderl 2019), (Haag und Anderl 2018) – Methode zur automatisierten Modifikation von geometrischen Produktdarstellungen eines Digitalen Zwillings. Fokus liegt auf 3D-Modell, das auf der Grundlage der tatsächlichen Geometrie des physischen Zwillings erzeugt wird.	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Santillan Martinez (Santillan Martinez et al. 2018a), (Santillan Martinez et al. 2018b) – Methode zur automatischen Erzeugung eines Digitalen Zwillings in Form eines Simulationsmodells in der Prozessindustrie.	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Jaensch (Jaensch et al. 2018), (Jaensch et al. 2019) – Modellbasiertes und datengetriebenes Konzept des Digitalen Zwillings, kombiniert mit Algorithmen der künstlichen Intelligenz (Reinforcement Learning), zur Lösung von spezifischen Aufgaben bei der Programmierung einer Steuerungslogik.	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Verl und Kienzlen (Verl und Kienzlen 2019) – Methode zur Verbesserung der Rechenzeit für Materialflussberechnungen des Digitalen Zwillings mittels Echtzeit-HIL-Simulation.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Rosen (Rosen et al. 2015) – Konzept eines Digitalen Zwillings zur Realisierung eines autonomen Teileflusses in der Produktionsanlage.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Uhlemann (Uhlemann et al. 2017a), (Uhlemann et al. 2017b) – Datenbankkonzept für eine multimodale Datenerfassung einer Produktion und deren Auswertung.	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
C. Wagner (Wagner et al. 2017) – Konzept einer Industrie 4.0 Geräte-Verwaltungsschale mit einem Digitalen Zwilling, der sich nicht nur auf den Simulationsaspekt fokussiert.	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Jiang (Jiang et al. 2020) – Implementierungsframework für einen Digitalen Zwilling von Logistiksystemen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Raza (Raza et al. 2018) – Framework für einen Digitalen Zwilling um ein Produkt mithilfe der RFID-Technologie innerhalb einer Fertigung nachzuverfolgen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Preuveneers (Preuveneers et al. 2018) – Digitaler Zwilling für Schutzvorrichtungen in einem Industrie 4.0 Fertigungsworkflow in Form von Funktionsschaltern zur Prozesssimulation.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
R. Wagner (Wagner et al. 2019) – Konzept für einen Digitalen Zwillings zur Simulation eines Wertstromes. Ziel ist es, Fertigungsabweichungen beim Produktzwilling zu identifizieren, um das Qualitätsniveau zu erhöhen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Schluse (Schluse et al. 2017), (Schluse et al. 2018), (Schluse und Rossmann 2016) – Konzept eines experimentierbaren Digitalen Zwillings, der die modellbasierte Systemtechnik mit der Idee des Digitalen Zwillings kombiniert und bei der Simulation komplexer Systeme Anwendung findet.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Li (Li et al. 2020) – Digitaler Zwilling für ein Labormodell basierend auf einer gemeinsamen Plattform zur Nutzung von Instrumenten. Das Konzept ermöglicht eine Vorhersage von Fehlern im Laborbetrieb.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Assawaarayakul (Assawaarayakul et al. 2020) – Konzept zur Erstellung eines Digitalen Zwillings durch die Umrüstung eines bestehenden Produktionssystems am Beispiel einer Maschine	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Gehrmann und Gunnarsson (Gehrmann und Gunnarsson 2020) – Konzept eines Digitalen Zwillings zur Nutzung von Cyber-Security - Anwendungen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Guiffo Kaigom und Rossmann (Guiffo Kaigom und Rossmann 2020) – Digitaler Zwilling eines einzelnen Roboters, der Roboterdaten aufzeichnet.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Die zuvor skizzierten drei Ansätze (Garrido und Sáez 2019), (Barthelmey et al. 2019), (Um et al. 2017) werden jedoch nicht an einem größeren Produktionssystem mit mehreren zusammenhängenden Fertigungsstationen evaluiert und fokussieren keine Integrationsplanung. ASHTARI TALKHESTANI (Ashtari Talkhestani et al. 2017), (Ashtari Talkhestani et al. 2019) und ZIPPER (Zipper et al. 2018), (Zipper und Diedrich 2019) fokussieren die Synchronisation eines Digitalen Zwillings in Form einer Simulation in der Engineering-Phase, insbesondere der virtuellen Inbetriebnahme einer Produktionsanlage. Beide Ansätze beziehen sich nicht auf die Produktionsplanung. Es wird kein komplexes Produktionssystem, das über eine Fertigungszelle hinausgeht, betrachtet. Ebenfalls ist die Synchronisation in beiden Fällen nur teilautomatisiert konzipiert, es erfolgt keine automatisierte Erstellung eines Digitalen Zwillings. ASHTARI TALKHESTANI (Ashtari Talkhestani et al. 2018a) entwickelt eine „Ankerpunktmethode“, die eine vom TIA-Portal exportierte XML-Datei einer SPS mit einer älteren XML-Dateiversion vergleicht und daraus Änderungen identifiziert. Durch Softwareankerpunkte detektiert seine Methode Abhängigkeiten zwischen Mechanik-, Elektrik- und Software-Domains bei allen von der SPS gesteuerten Anlagenkomponenten (Ashtari Talkhestani et al. 2018b). Dagegen verfolgt die Methode von ZIPPER (Zipper et al. 2018) einen Online-Optimierungsansatz, um Unterschiede zwischen Produktionsanlage und Simulation auszugleichen. SANTILLAN MARTINEZ (Santillan Martinez et al. 2018a), (Santillan Martinez et al. 2018b) gelingt es dagegen, eine Methode zu entwickeln, die einen Digitalen Zwilling für die Prozessindustrie automatisch erzeugt. Seine Methode fokussiert sich jedoch nicht auf eine Integrationsplanung in der Automobilindustrie und es bleibt offen, inwieweit er Anlagenstrukturen von Prozessanlagen bis hin zur Feldebene abbildet. Darüber hinaus fokussiert er sich auf einen kleinen Demonstrator in einem Versuchslabor und nicht auf eine reale Produktionsanlage in der Industrie, wodurch eine vergleichbare Komplexität des Produktionssystems nicht vorliegt (Santillan Martinez et al. 2018a). Auch HAAG UND ANDERL (Haag und Anderl 2019) betrachten eine automatisierte Modifikation eines Digitalen Zwillings, jedoch handelt es sich hierbei lediglich um dessen geometrische Darstellung. Sie generieren auf der Grundlage der Geometrie einer physikalischen Anlagenkomponente ein 3D-Modell. Dieser Ansatz geht damit jedoch in eine deutlich andere Richtung als mit der Zielsetzung dieser Abhandlung beabsichtigt. JAENSCH (Jaensch et al. 2018), (Jaensch et al. 2019) verfolgt ein modellbasiertes und datengetriebenes Konzept des Digitalen Zwillings, das sich in Kombination mit Algorithmen der künstlichen Intelligenz (insbesondere „Reinforcement Learning“) zur Lösung von spezifischen Aufgaben bei der Programmierung einer Steuerungslogik eignet. Er bildet die Anlagenstrukturen bis zur Feldebene ab, befasst sich jedoch nicht mit der Integrationsplanung und

2.1 Digitaler Zwilling zur Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung

behandelt ausschließlich Ressourceninformationen. VERL UND KIENZLEN (Verl und Kienzlen 2019) verbessern die Rechenzeit für Materialflussberechnungen des Digitalen Zwillings mittels einer Echtzeit-HiL-Simulation. Dabei betrachten sie den Materialfluss analog zu einem Fluid, wodurch der Vorteil einer von der Güteranzahl unabhängigen Berechnungsdauer entsteht. ROSEN (Rosen et al. 2015) beschäftigt sich dagegen mit Produkt-, Prozess- und Ressourceninformationen in Form eines Simulationsmodells. In seinem Konzept eines Digitalen Zwillings zur Realisierung eines autonomen Teileflusses in der Produktionsanlage werden reale Daten mit Simulationsmodellen kombiniert. Diese Kombination erlaubt seinem Konzept, Vorhersagen innerhalb des Produktionssystems zu treffen (Rosen et al. 2015). UHLEMANN (Uhlemann et al. 2017a) entwickelt ein Datenbankkonzept für eine multimodale Datenerfassung einer Produktion und deren Datenauswertung. Hierbei konzentriert er sich auf Produkt- und Prozessdaten wie beispielsweise Produktions- und Bearbeitungszeiten sowie die Auslastung von Maschinen (Uhlemann et al. 2017b). Ressourceninformationen werden im Datenbankkonzept nicht mit einbezogen. Ebenso wie bei VERL UND KIENZLEN (Verl und Kienzlen 2019) als auch bei ROSEN (Rosen et al. 2015) liegt der Fokus von UHLEMANN ET AL. (Uhlemann et al. 2017a) nicht auf der automatischen Erzeugung eines digitalen Zwillings für die Integrationsplanung. C. WAGNER (Wagner et al. 2017) forscht an einer I4.0-Infrastruktur, mit der er eine Verbindung zwischen physikalischem Gerät und einer „Plant I4.0“-Infrastruktur in der Informationswelt herstellt. In seinem Konzept tauschen einzelne Softwarewerkzeuge in unterschiedlichen Lebensphasen einer Produktionsanlage Informationen untereinander aus. Auch wenn sich C. WAGNER (Wagner et al. 2017) nicht auf die Integrationsplanung konzentriert, beschränkt sich sein Ansatz erstmals nicht nur auf eine Simulation, sondern umfasst weitere Entwicklungsphasen einer Produktionsanlage wie beispielsweise eine Planung. Seine Forschung ist jedoch nicht auf die automatische Erstellung eines Digitalen Zwillings ausgerichtet. Er betrachtet ausschließlich Ressourceninformationen. Des Weiteren wurde sein Konzept nicht an einem komplexen Produktionssystem im industriellen Umfeld validiert, sondern es beschreibt eine Idee. JIANG (Jiang et al. 2020) entwickelt ein Implementierungsframework für Logistiksysteme. Ein Logistiksystem ist zwar ebenfalls komplex wie ein Produktionssystem, aber beide Systeme unterscheiden sich deutlich im Aufbau und bei der Zusammensetzung der Systemkomponenten, wodurch das Konzept nicht übertragen werden kann. Weiter fehlt die automatisierte Erstellung in diesem Konzept. Die Konzepte von RAZA (Raza et al. 2018), PREUVENEERS (Preuveneers et al. 2018), R. WAGNER (Wagner et al. 2019), SCHLUSE (Schluse et al. 2017), (Schluse et al. 2018), (Schluse und Rossmann 2016), LI (LI et al. 2020), ASSAWAARAYAKUL

(Assawaarakul et al. 2020) sowie von GEHRMANN UND GUNNARSSON (Gehrmann und Gunnarsson 2020) sind teilweise für Systeme mit geringer Komplexität entwickelt. Bei diesen Ansätzen fehlen sowohl die für eine Integrationsplanung relevanten Inhalte als auch die automatisierte Erstellung des Digitalen Zwillings. In allen Konzepten konnte weder eine aktuelle noch eine vollständige automatische Erstellung eines Digitalen Zwillings für die Integrationsplanung im Karosserierohbau ansatzweise identifiziert werden. Somit gibt es aktuell keine Methode eines Digitalen Zwillings zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau.

2.1.3 Fazit zum Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich Digitaler Zwilling

Auf Basis dieser Literaturlauswertung lässt sich mit Bezug zu den zu erfüllenden industriellen Anforderungen für die Entwicklung der Methodik „Digitaler Zwilling für die Integrationsplanung“ folgendes Fazit zum Stand der Wissenschaft und Technik ziehen:

Industrielle Wissenslücke und Forschungslücke

Ausgehend von der Problemformulierung und Zielsetzung wurde der Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich Digitaler Zwilling untersucht. Dabei ist festzuhalten, dass bereits sehr viele Konzepte im Bereich „Digitaler Zwilling“ vorliegen. Obwohl das Thema „Digitaler Zwilling“ offenkundig ein aktuelles und sehr relevantes Forschungsfeld ist, bei dem die Anzahl der Publikationen in der Literatur rapide zunimmt, fehlt jedoch die Betrachtung einer automatischen Erstellung eines „Digitalen Zwillings“ für eine Integrationsplanung im Karosserierohbau. Die Literaturrecherche zeigt, dass sich die bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten im Bereich „Digitaler Zwilling einer Produktionsanlage“ hauptsächlich auf die Engineering-Phase beziehen, insbesondere auf den Einsatz unterschiedlicher Simulationsmodelle. Im Methodenbereich „Simulation“ gibt es bereits erste Ansätze zur (teil-) automatisierten Erstellung und zur Synchronisierung von „Digitalen Zwillingen“, dennoch besteht weiterer Forschungsbedarf im Bereich „Digitaler Zwilling“. Es konnte kein Ansatz identifiziert werden, der sich mit einem „Digitalen Zwilling“ für eine Integrationsplanung im Karosserierohbau beschäftigt. Kein Forschungsansatz behandelt einen Digitalen Zwilling eines komplexen Produktionssystems, das Ressourcen-, Produkt- und Prozessinformationen enthält und die komplette Planungsstruktur über Fertigungsstationen bis hin zur Feldebene abdeckt. Besonders der Bereich der automatischen Erzeugung eines „Digitalen Zwillings“ bezüglich der Integrationsplanung, bestehend aus relevanten Produkt-, Prozess- und Ressourceninformationen, wurde in bisherigen Forschungen nicht miteinbezogen. Des Weiteren ist festzustellen, dass das Forschungsgebiet „Digitaler Zwilling“ immer mehr zur Anwendung kommt (Biesinger und Weyrich 2019). Es fehlen

heute jedoch anwendungsorientierte Untersuchungen hinsichtlich der Skalierung auf komplexe Produktionssysteme wie beispielsweise einen automobilen Karosserierohbau. Vorliegende Ansätze erfüllen weder eine automatisierte Erstellung eines aktuellen noch vollständigen Digitalen Zwillings für die Integrationsplanung im Karosserierohbau. Somit existiert keine bestehende Methodik, die die Zielsetzung einer automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau durch einen Digitalen Zwilling erfüllt.

Es liegt eine Forschungslücke hinsichtlich einer fehlenden Methodik eines Digitalen Zwillings zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung komplexer Produktionssysteme wie einem Karosserierohbau vor.

Erörterung des wissenschaftlichen Spektrums und Abgrenzung

Zur Erörterung des wissenschaftlichen Spektrums dieser Dissertation eignet sich eine Einordnung der Thematik in das „Reifegradmodell für Digitalisierung“ in Anlehnung an WEYRICH (Weyrich 2019) siehe Abbildung 2-1. WEYRICH (Weyrich 2019) gliedert den Reifegrad hin zur „Intelligenten Automatisierung basierend auf dem Digitalen Zwilling“ in die fünf Reifezustände: „Konnektivität“, „Sichtbarkeit“, „Transparenz“, „Vorhersagbarkeit“ und „Anpassungsfähigkeit“.

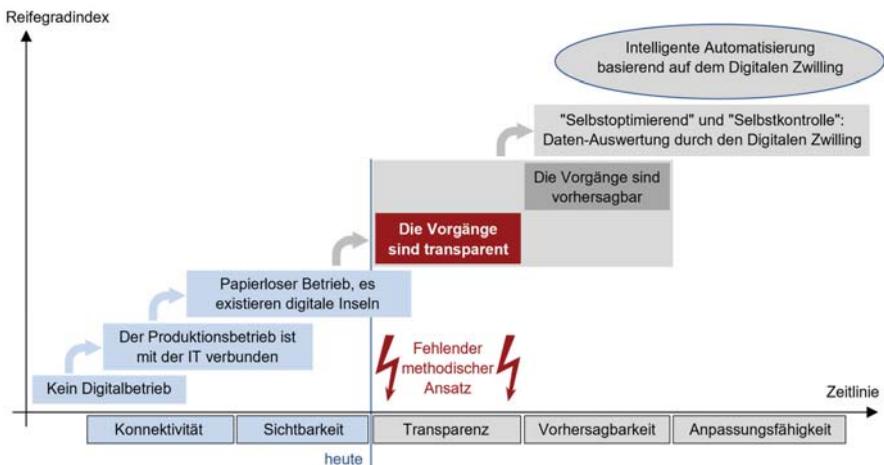


Abbildung 2-1: Einordnung der Forschung in den Reifegradindex für Digitalisierung nach (Weyrich 2019)

Die Reifezustände „Konnektivität“ und „Sichtbarkeit“ konnten bereits erreicht werden. So konnte in den vergangenen Jahren eine Verbindung zwischen der IT und dem Produktionsbetrieb etabliert

werden. Außerdem wurden Erfolge bei der Digitalisierung hin zum papierlosen Betrieb erzielt. Dennoch existieren heute viele „digitale Inseln“. Diese digitalen Datenbestände werden nicht automatisiert aktualisiert, worunter ihre Aktualität leidet und als Folge „Intransparenz“ verursacht wird. Gemäß WEYRICH (Weyrich 2018a) gewinnt die bisher offengebliebene Frage, wie Transparenz innerhalb einer Produktion sicherzustellen ist, im Hinblick auf die Konzepte des Digitalen Zwillinges deutlich an Relevanz. Ein Beispiel für fehlende Transparenz in der Produktion aus der Industrie sind digitale Planungsprojekte und weitere Bestandsdaten im Karosserierohbau, deren Transparenz im Hinblick auf die „Aktualität“ und „Vollständigkeit“ von Informationen für Integrationsplanungen notwendig ist (Biesinger et al. 2019a). Unter Berücksichtigung der Forschungsleitfrage und der sich daraus ergebenden Teilfragen lässt sich diese Arbeit in das Forschungsspektrum zur Schaffung von „Transparenz“ einordnen. Auf diesem Reifezustand können zukünftig weitere Reifestufen wie „Vorhersagbarkeit“ im Hinblick auf vorausschauende Wartung und „Anpassungsfähigkeit“ bezüglich selbstoptimierender autonomer Automatisierungssysteme aufbauen. Das „Reifegradmodell für Digitalisierung“ der Abbildung 2-1 zeigt, dass die Forschung zur Sicherstellung von „Transparenz“ einen bedeutenden Beitrag zur „intelligenten Automatisierung basierend auf dem Digitalen Zwilling“ leisten kann. Die hochautomatisierten Produktionsanlagen im Karosserierohbau beinhalten zudem eine gewisse Standardisierung der Hard- und Software. Manuelle und teilautomatisierte Produktionskonzepte sowie Montageanlagen stehen nicht im Fokus dieser Arbeit. Ebenso ist der Simulationsaspekt des Digitalen Zwillinges kein Schwerpunkt dieser Dissertation.

Die Forschung dieser Arbeit bezieht sich darauf, den Digitalen Zwilling für die praktische Anwendung in einem komplexen Produktionssystem nutzbar zu machen. Sie fokussiert hierbei insbesondere die Skalierbarkeit eines Digitalen Zwillinges auf ein komplexes Produktionssystem und die Sicherstellung von Transparenz. Hierfür wird eine Methodik zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität entwickelt. Diese Methodik wird auf den Anwendungsfall der Integrationsplanung angewandt und deren Mehrwert systematisch anhand einer Fallstudie an einem Karosserierohbau eines internationalen Automobilherstellers evaluiert.

2.2 Integrationsplanung im Karosserierohbau

Im Folgenden werden die Grundlagen zur Produktionsplanung im Karosserierohbau behandelt und die zunehmende Bedeutung der Integrationsplanung aufgezeigt. Dabei thematisiert das Kapitel auch die heutigen Defizite bei der Integrationsplanung. Abgeschlossen wird das Kapitel mit Ausführungen zur Datenqualität, die maßgeblich zum Erfolg bei der Integrationsplanung beiträgt.

2.2.1 Produktionsplanung im Karosserierohbau

Die Produktionsplanung ist ein wesentlicher Teilbereich einer Fabrikplanung (Wiendahl et al. 2014, S. 454). Der Begriff „Produktionsplanung“ wird häufig auch im Zusammenhang mit der Produktionsprogrammplanung verwendet, die die Beschaffung, Kapazitätsplanung und Auftragssteuerung sowie Auftragsfreigabe umfasst (Schack 2008), (Grundig 2018), (Pawellek 2014). Nachfolgend soll der Begriff “Produktionsplanung“ jedoch für eine auftragsneutrale Planung eines Produktionssystems stehen. Der Aufgabenbereich der Produktionsplanung reicht von der Planung einzelner Maschinen, Nebeneinrichtungen und Umplanungen von Teilbereichen der Produktion bis hin zur Erstellung eines neuen Werks (VDI-Richtlinie 4499). Die Produktionsplanung läuft größtenteils parallel zur Produktentwicklung ab, wobei sich die Struktur und die Geometrien des Produktes während des Produktentwicklungsprozesses häufig noch verändern (Walla 2015). Auf diese Änderungen muss eine Produktionsplanung im Laufe des Planungsprozesses eingehen. Innerhalb der Produktion ist die Unterscheidung zwischen Produkt, Prozess und Ressource (PPR) weit verbreitet (Pfrommer et al. 2013, S. 1), (Cutting-Decelle et al. 2007), (Marks et al. 2018, S. 627). Die Teil-Aufgaben innerhalb der Produktionsplanung werden im Karosserierohbau ebenfalls in Produktplanung, Prozessplanung und Ressourcenplanung gegliedert (siehe Abbildung 2-2). Nach der *Fahrzeug-Architektur-Strategiephase* beginnt die *Erstellung einer Fügefolge*, worauf unterschiedliche Aufgaben der Produkt- und Prozessplanung sowie der darauf basierenden Ressourcenplanung aufbauen. Die Fügefolge legt den Zusammenbau des Produktes und damit auch die Reihenfolge der Arbeitsschritte fest (Draht 2010).

Produktplanung:

Im Rahmen des Produkt- und Prozessgestaltungsprozesses (PPG-Prozess) werden die Anforderungen aus der Produktion von der Produktplanung bei der Produktentwicklung platziert. Zusammen mit der Fahrzeugentwicklung entstehen hier Lösungen für zukünftige Produkte (Walla 2015). Die „Digitale Absicherung“ dient zur Prozessabsicherung. Hierbei werden digitale Softwarewerkzeuge genutzt. Eine weitere Aufgabe der Produktplanung ist das Ableiten des Spann- und Fixierkonzeptes aus der Fügefolge. Auf dem Spann- und Fixierkonzept baut wiederum die Heftpunktfestlegung auf. Planer sprechen bei den Heftpunkten auch von sogenannten „Geopunkten“. Die Fahrzeugseitenwand hat beispielsweise viele Fügpunkte, die aufgrund der begrenzten Taktzeit nicht alle innerhalb einer Zelle gefügt werden können (Walla 2015). Deshalb ist es zweckmäßig, erst die Heftpunkte zu fügen, damit die Karosserie zusammengehalten werden kann. In den darauffolgenden Fertigungszellen erfolgt

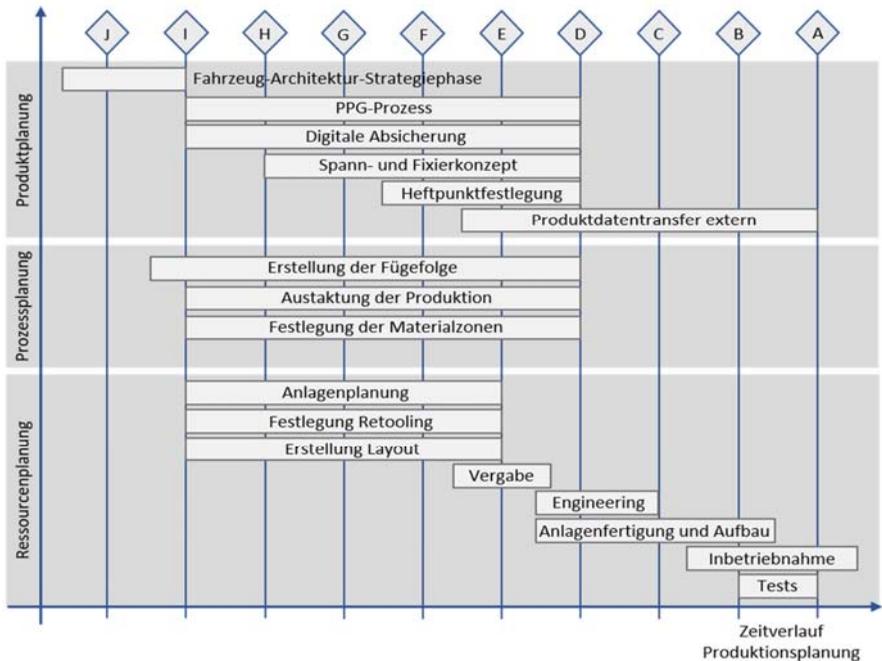


Abbildung 2-2: Übersicht der Aufgaben einer Produktionsplanung in der Automobilindustrie nach (Walla 2015)

dann das vollständige Verschweißen der Karosserie. Im Rahmen der Produktplanung werden die Produktdaten sicher an den Anlagenlieferanten übergeben (Produktdatentransfer extern).

Prozessplanung:

Auf Basis der Fügefolge wird ebenfalls die Verbau-Reihenfolge innerhalb der Prozessplanung festgelegt. Die Verbau-Reihenfolge legt fest, welche Fahrzeugteile nacheinander zusammengebaut werden müssen (Walla 2015). Die Verbau-Reihenfolge bestimmt daher die Stationsabfolge in einem Karosserierohbau. Bei der Prozessplanung findet die Verteilung der benötigten Prozesse auf einzelne Fertigungsstationen statt, sodass der vorgegebene Takt nicht überschritten wird (Walla 2015). Ebenso müssen die Materialzonen und Anlieferungskonzepte der einzelnen Fahrzeugteile mit der Logistikplanung koordiniert und festgelegt werden (Walla 2015), (Burr 2008).

Ressourcenplanung:

Innerhalb der Ressourcenplanung werden alle Betriebsmittel geplant, die zur Durchführung der festgelegten Prozesse und zur Erfüllung von deren Aufgaben notwendig sind (Walla 2015). Diese

Ressourcen sind hierarchisch als Planungsprojekt zu strukturieren und einzuplanen, Produktionsplaner sprechen hierbei auch von der Erstellung des sogenannten „Mengengerüsts der Ressourcen“. Ein Automobilhersteller möchte möglichst viele Standardbetriebsmittel einsetzen (Walla 2015). Deshalb werden hier Ressourcen aus einer Planungsbibliothek genutzt, die die zuvor festgelegten Standardbetriebsmittel zur Verfügung stellt. Auf Basis des erarbeiteten Mengengerüsts lassen sich unterschiedliche Softwareprogramme nutzen, die unterschiedliche Auswertungen generieren. Ein wertvoller Bestandteil ist hierbei ein Programm (Visual Basic - Makro) zur „Reference-Calculation“ (REC) und Kostenauswertung, das innerhalb des Vergabeprozesses an externe Anlagenlieferanten eine bedeutende Rolle einnimmt. Neben der Festlegung des Mengengerüsts wird ebenfalls der Flächenbedarf geschätzt. Auf Basis des Flächenbedarfs ist es möglich, zu ermitteln, ob sich die Produktionsanlage am gewünschten Standort realisieren lässt (Burr 2008). Als nächster Schritt startet der Vergabeprozess durch eine Ausschreibung des geplanten Vorhabens. Denn Produktionsanlagen werden nicht vom Automobil-OEM selbst, sondern von einem externen Anlagenlieferanten gefertigt und aufgebaut (Walla 2015). Mit Bezug zu den Ausschreibungsanforderungen erstellen mehrere Anlagenlieferanten einen Planungsentwurf für die Produktionsanlage und liefern dabei unterschiedliche Lösungsvarianten. In vielen Fällen wird ein sogenanntes "Cherry-Picking" durchgeführt, bei dem die besten Lösungsvarianten der verschiedenen Bewerber für eine weitere Ausschreibungsrunde gesammelt werden. Um den Auftrag bewerben sich etliche Anlagenlieferanten. Oft gibt es mehrere Ausschreibungsrunden, in denen sich die Anzahl der in Frage kommenden Bewerbern deutlich reduziert. Vor einer endgültigen Auftragsvergabe erarbeitet der Anlagenlieferant zusammen mit dem OEM Einsparungspotenziale für die Realisierung des „neuen“ Produktionssystem. Anschließend kommt es zur Vergabe des Auftrags an den geeignetsten Anlagenlieferanten. Nach der Auftragsvergabe an den ausgewählten Anlagenlieferanten erfolgt dort die weitere detaillierte Planung, was in der Praxis „Engineering“ genannt wird. Das Engineering umfasst beispielsweise die Betriebsmittelkonstruktion, die sich aus dem Spann- und Fixierkonzept ableitet (Burr 2008). Innerhalb des Engineerings gibt es heute zahlreiche verschiedene Simulationmethoden, um technische Systeme mit hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit abzusichern (Vogelpohl et al. 2013, S. 579). Bedeutende Bestandteile des Engineerings sind somit ebenso die Roboterprogrammierung und -simulation, die virtuelle Inbetriebnahme sowie weitere elektro- und steuerungstechnische Planungen (Schmidt et al. 2014, S. 2). Robotersimulationen, auch Offline-Simulationen genannt, sind ein Hilfsmittel, um die Programmierung der Roboter in Roboterzellen vorab offline durchzuführen (Amthor et al. 2011, S. 215). Ebenso werden bei der

virtuellen Inbetriebnahme speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) vor der realen Inbetriebnahme intensiv auf Funktionen und unter Last getestet (Meyer und Grillitsch 2020, S. 275). Anschließend beginnen der Aufbau und die Inbetriebnahme der Produktionsanlage vor Ort. Eine Produktionsanlage im Karosserierohbau besteht heute aus elektrischen, mechanischen und mechatronischen Anlagenkomponenten. Insbesondere mechatronische Anlagenkomponenten, die die Eigenschaften elektrischer und mechanischer Anlagenkomponenten vereinen und zudem über einen Mikroprozessor mit entsprechender Software verfügen, spielen im Karosserierohbau eine immer größere Rolle (Gehrke 2005, S. 19), (Halbmayer 2009). Nach einem erfolgreichen Produktionstest, der ebenfalls vom Anlagenlieferant und der Produktionsplanung eines OEM begleitet wird, kann die Anlage an die Produktion übergeben werden (Walla 2015). Hierbei wird je nach Spezifikation optional eine sogenannte „Enddokumentation“ in Form einer aktualisierten Dokumentation zum Planungsprojekt übergeben.

Zwischenfazit

Die Planung der Ressourcen einer Produktionsanlage wird maßgeblich von der Produkt- und Prozessplanung bestimmt. Es besteht damit die Notwendigkeit, das jeweilige Produkt mit den Fertigungsressourcen insbesondere datentechnisch zu verknüpfen, um die Lücke zwischen Produkt und Produktionsprozess schließen zu können (Ferrer et al. 2015, S. 1104).

2.2.2 Integrationsplanung entwickelt sich zur Hauptaufgabe bei der Produktionsplanung

In der Produktionsplanung wird zwischen Greenfield- und Brownfield-Planungen unterschieden. Bei einer Greenfield-Planung wird eine Produktionsanlage vollständig neu auf eine „grüne Wiese“ in das Fabrikgebäude platziert. Die meisten Planungen erfolgen heute jedoch in der Regel im "Brownfield" (Kiefer et al. 2017, S. 447), (Küber 2017). „Brownfield“ bedeutet, die Errichtung der Anlage erfolgt innerhalb eines bereits bestehenden Industriegeländes sowie eines bestehenden Produktionssystems (Günther 2015, S. 176). Die Integrationsplanung ist eine Brownfield-Planung, bei der ein neues Fahrzeugmodell in die existierende Produktionsanlage integriert wird.

Unter „Integrationsplanung“ verstehen Produktionsplaner eine Planung zur Integration eines neuen Fahrzeugs in eine bestehende Produktionsanlage. Integrationsplanungen erweisen sich als ein bedeutender Stellhebel zur Steigerung der Effizienz in automobilen Produktionsnetzwerken.

Zunehmende Bedeutung der Integrationsplanung

Derzeit ist ein wachsendes Angebot an Fahrzeugmodellen und –varianten zu verzeichnen, die in immer kleinerer Anzahl produziert werden müssen (Göpfert et al. 2017, S. 15), (Dudenhöffer und Dudenhöffer 2017), (Mößmer et al. 2007), (Berger et al. 2017, S. 231). Dadurch steigt der Anspruch an ein Produktionssystem und dessen Planung, insbesondere durch die unterschiedlichen Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor sowie Fahrzeugarchitekturen von Elektrofahrzeugen (Karle 2017). Des Weiteren verkürzen sich die Produktlebenslaufzyklen (Thommen et al. 2017, S. 13), während ein gegensätzlicher Trend hin zu länger werdenden Anlagenlebenszyklen zu verzeichnen ist (Biesinger et al. 2019a, S. 2). Zusätzlich zwingt die Corona-Pandemie Automobilhersteller zu erheblichen Kosteneinsparungen (Stuttgarter Zeitung 07.08.2020), (Welt 16.08.2020). Dadurch steigt die Bedeutung der Wiederverwendung von Produktionsanlagen. Im Bestreben, den dabei wachsenden Anforderungen gerecht zu werden, ergibt sich für produzierende Unternehmen die Notwendigkeit, Produktionssysteme wiederzuverwenden bei gleichzeitiger Steigerung der zu produzierenden Produktvarietät (Stanev 2012), (Landherr et al. 2013, S. 172). Da Produktionsanlagen mehr als für einen Produktionszyklus eingesetzt werden können, kommt es immer häufiger zur Integration neuer Produkte in die bestehenden Produktionseinrichtungen (Walla 2015). Gleichzeitig ist eine optimierte Kapazitätsauslastung trotz vieler unterschiedliche Modelle, die auf der Produktionsanlage produziert werden, ein Wettbewerbsvorteil (Dudenhöffer und Dudenhöffer 2017). Der Stellhebel zur Optimierung ist in der Planungsphase besonders groß gegenüber dem laufenden Betrieb (Bertagnolli 2018, S. 263). In der Summe resultieren diese Entwicklungen in einer zunehmenden Bedeutung der Integrationsplanung (Schindler 2019), (Kiefer et al. 2017), (Bracht et al. 2011). Somit erweist sich die Integrationsplanung als zentrale Aufgabenstellung bei der Planung von Produktionssystemen (Schindler 2019). In Abbildung 2-3 wird der Prozessablauf einer Integrationsplanung blau dargestellt. Zur Integrationsplanung eines neuen Fahrzeugs B in die bestehende Produktionsanlage ist es naheliegend, auf dem ursprünglichen Planungsprojekt aufzusetzen. Das Aufsetzen auf das ursprüngliche Planungsprojekt ist aufgrund der mangelnden Aktualität der bisherigen Daten nicht zweckmäßig (Huber 2016, S. 74). Da in der Praxis zahlreiche individuelle Werkzeuge und Softwaresysteme innerhalb der Planung und des Engineerings eingesetzt werden, kommt es zu verschiedenen Repräsentationsformen des Produktionssystems (Schindler 2019). Diese Teilmodelle, die das Produktionssystem aus der Perspektive unterschiedlicher Disziplinen abbilden, lösen Medienbrüche aus und führen zu einer Heterogenität der Daten und Datenmodelle (Huber 2016, S. 74). Diese Wirkungen torpedieren die Ansätze einer ganzheitlichen Planung (Schindler 2019). Für

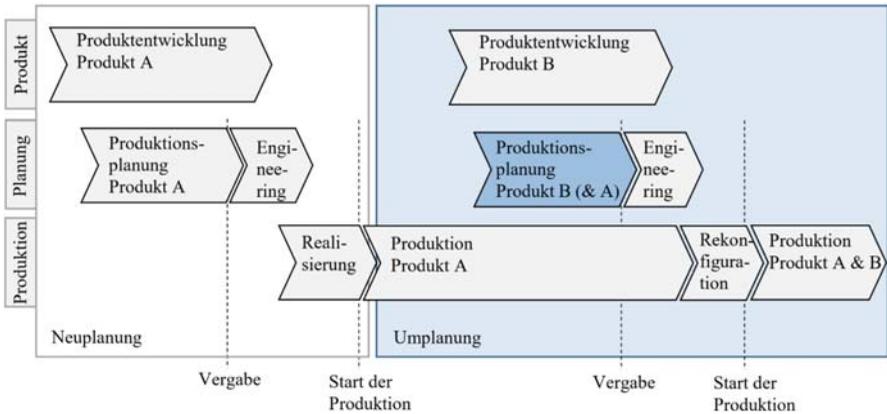


Abbildung 2-3: Integrationsplanung als Teil des Lebenszyklus eines Produktionssystems in Anlehnung an (Walla und Kiefer 2011) und (Kiefer et al. 2018)

die Integrationsplanung ist ein aktuelles Abbild der Situation unerlässlich. Ein Planer benötigt daher den Großteil seiner Zeit für die relevante Informationsbeschaffung (Bracht et al. 2011), (Dinse 2015, S. 132). Eine Entlastung des Planers von dieser Tätigkeit kann ihm mehr Freiraum für die gestaltenden und bewertenden Tätigkeiten zur Optimierung des Produktionssystems geben (Bracht et al. 2011, S. 60). Nach der Produktionsplanung des „Produktes A“ zum Zeitpunkt der Vergabe (linke Seite der Abbildung) hat das interne digitale Planungsprojekt des „Produktes A“ die beste Datenqualität. Oftmals erfolgt nach der Planung eine Weiterentwicklung des Produktionssystems, beispielsweise bei der Automatisierung (Marks 2020, S. 20). Deshalb nimmt die Qualität des Planungsprojektes aufgrund der Weiterentwicklung des Produktionssystems durch das noch detailliertere Engineering des externen Lieferanten ab. Weitere Optimierungen werden direkt in der Realisierungsphase vor Ort umgesetzt. Bei der Anlagenabnahme ist es noch möglich, den Anlagenlieferanten für die Bereitstellung einer Enddokumentation zu beauftragen. Selbst diese Enddokumentation ist jedoch aufgrund von Änderungen an den Produktionsanlagen während des Produktionsbetriebes zum Zeitpunkt der Integrationsplanung in der Regel veraltet. Die Anforderungen an das Produktionssystem ändern sich oft im Laufe eines Anlagenlebenslaufs (Westkämper und Löffler 2016). Während des gesamten Lebenszyklus der Produktionsanlagen ist zum Beispiel immer wieder ein Umbau der Produktionsanlage notwendig, um neue Fahrzeugvarianten integrieren zu können (Walla und Kiefer 2011). Spätestens nach drei bis vier Jahren erfolgt eine Modellpflege, wodurch es zu einem größeren Umbau der Produktionsanlage kommt. Häufig gibt es auch Variantenintegrationen in das bestehende Produktionssystem, die zu

einer Erweiterung der Produktionsanlage führen. Diese gehören in das Aufgabengebiet der Serienplanung (Walla 2015). Die Serienplanung beauftragt hierfür wiederum externe Anlagelieferanten. Die Praxiserfahrungen zeigen, dass Änderungen am Produktionssystem oft nicht oder nur teilweise aktualisiert werden (Kiefer 2007). Weitere Gründe, die zu einer schlechten Datenqualität führen, sind fehlerhafte Rückmeldungen und eine ungenaue Datenerfassung (Schuh et al. 2017, S. 82). Oft wird der Datenaustausch auch durch organisatorische oder technische Hindernisse behindert (Berger et al. 2007, S. 1). WESTKÄMPER UND LÖFFLER (Westkämper und Löffler 2016) sehen die Differenz zwischen Realität in der Produktion und den digitalen Informationen hierzu als eine der größten Schwächen heutiger Informationsverarbeitung an. Mangelhafte Datenqualität beeinträchtigt wiederum die Planungsqualität (Schuh et al. 2017, S. 82). Eine Produktionsplanung ist immer nur so gut wie die Datengrundlage, die zur Planung herangezogen wird (Schuh et al. 2017, S. 82). Daraus resultiert, dass die derzeitige „Datenqualität“ der ursprünglichen Planungsprojekte als Aufsetzpunkt für Integrationsplanungen ungeeignet ist. Es wird ein Digitaler Zwilling zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau benötigt.

2.3 Verbesserung der Datenqualität

WÜRTHELE (Würthele 2003) definiert die Datenqualität als: „Mehrdimensionales Maß für die Eignung von Daten, den an ihre Erfassung/Generierung gebundenen Zweck zu erfüllen“. Die Datenqualität (DQ) lässt sich heute in vier Kategorien und 19 Dimensionen unterteilen (VDI/VDE-Richtlinie 3714). Die DQ teilt sich hierbei in die Kategorien „systemunterstützt“, „zweckabhängig“, „inhärent“ und „darstellungsbezogen“ (VDI/VDE-Richtlinie 3714), (Rohweder et al. 2018), (Hoffmann 2018). Basierend auf dieser Richtlinie zeigt Abbildung 2-4 die entsprechenden Dimensionen der Datenqualität zugeordnet zur jeweiligen Kategorie (VDI/VDE-Richtlinie 3714). In dieser Arbeit soll die DQ hinsichtlich der Verwendung digitaler Daten für eine Integrationsplanung gesteigert werden. Folglich liegt der Fokus dieser Dissertation im Weiteren auf der zweckabhängigen Kategorie der Datenqualität. Mit Blick auf den Anwendungsaspekt der Integrationsplanung sind die Dimensionen „Relevanz“, „Aktualität“ und „Vollständigkeit“ besonders bedeutsam. Diese drei Dimensionen wurden bereits in der Literaturanalyse von WAND UND WANG (Wand und Wang 1996) im Jahr 1996 unter den fünf meistgenannten Datenqualitätsdimensionen der damaligen Literatur angesprochen. WANG UND STRONG (Wang und Strong 1996) gliederten die Datenqualitätsdimensionen zusätzlich in vier Kategorien. Dabei ordneten sie die Datendimensionen

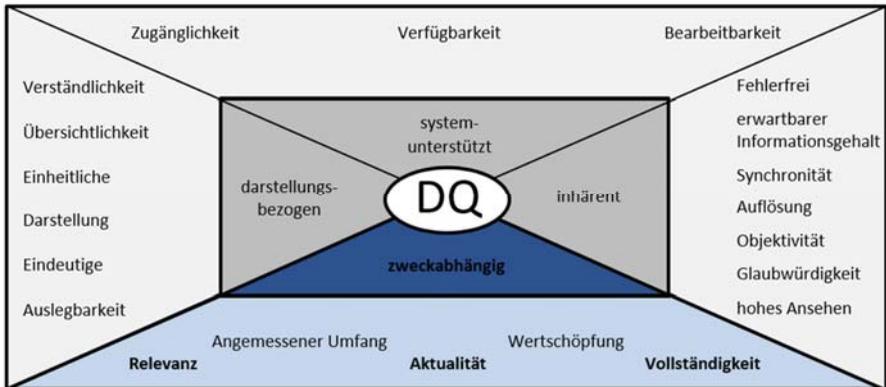


Abbildung 2-4: Dimensionen der Datenqualität in Anlehnung an (Rohweder et al. 2018)

„Angemessener Umfang“, „Wertschöpfung“ sowie die für diese Arbeit relevanten Dimensionen „Relevanz“, „Aktualität“ und „Vollständigkeit“ der Kategorie „zweckabhängig“ zu. Der heutige Stand der Wissenschaft und Technik beruht überwiegend auf die Grundlagen von WANG UND STRONG (Wang und Strong 1996), wobei den Dimensionen „Relevanz“, „Aktualität“ und „Vollständigkeit“ in der Literatur mit Blick auf die Datenqualität schon immer einen hohen Stellenwert zugesprochen werden (Rohweder et al. 2018), (Helfert 2002), (VDI/VDE-Richtlinie 3714), (Würthele 2003).

Fazit: Die Datenqualität von Bestandsdaten ist heute in der Regel als Aufsetzpunkt für eine Integrationsplanung ungeeignet. Um einen praktikablen Aufsetzpunkt für eine Integrationsplanung zu erreichen, ist die Verbesserung der Datenqualität relevanter Informationen in den Metriken „Aktualität“ und „Vollständigkeit“ unbedingt notwendig.

2.4 Anforderungen an die Methodik sowie Forschungsfragen

Mit Bezug zu der Problemstellung, den Herausforderungen, der Forschungslücke und der Zielsetzung ergeben sich folgende Anforderungen an die Methodik. Die automatisierte Methoden-anwendung des Digitalen Zwillinges soll die Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau verbessern. Anknüpfend daran ist die Forschungsleitfrage zu beantworten: „**Wie kann ein Digitaler Zwillig die Datenqualität für Integrationsplanungen im Karosserierohbau automatisiert verbessern**“? In diesem Kontext sind verschiedene Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik abzuleiten. Diese Anforderungen wiederum führen zu mehreren wissenschaftlichen Teilfragen. Bei der Konzeption und Umsetzung der Methodik spielen die Skalierung der Methodik auf ein komplexes Produktionssystem und die Automatisierung eine entscheidende Rolle. Die Methodik muss so

konzipiert werden, dass sie den Karosserierohbau, der derzeit durch mangelnde Datenaktualisierung und Dateninkonsistenz geprägt ist, durch den Digitalen Zwilling trotz digitaler Komplexität automatisiert abbilden kann. Daraus ergeben sich folgende Anforderungen.

Anforderung 1: Die Methodik muss automatisiert ablaufen und auf das komplexe Produktionssystem „Karosserierohbau“ skalierbar sein. Bei der Anwendung der Methodik ist die Gefahr einer Störung in der laufenden Produktion auszuschließen.

Teilfrage 1: Was ist bei der Umsetzung der Methodik zu beachten, um die Skalierung auf das komplexe System „Karosserierohbau“ zu bewerkstelligen und einen automatisierten Ablauf zu ermöglichen?

Teilfrage 2: Wie kann die Gefahr einer Störung des laufenden Produktionsbetriebs bei der Anwendung der Methodik ausgeräumt werden?

Anforderung 2: Die zu entwickelnde Methodik muss einen Digitalen Zwilling für Integrationsplanungen vollständig erzeugen. Dabei ist das Mengengerüst der Ressourcen, das aus einer hierarchischen Planungsstruktur und aus den sich darin befindenden Ressourcen der Produktionsanlage besteht, lückenlos abzubilden. Die Planungsstruktur muss alle Anlagen und Stationen sowie die sich darin befindenden Ressourcen komplett wiedergeben. Die Ressourcen müssen hierbei von den relevanten Betriebsmitteln bis ins Detail zu jedem Spanner und Sensor (Feldebene) vollständig sein. Ebenso sind die für die Integrationsplanung relevanten Prozess- und Produktinformationen automatisiert zu erstellen. Aus der Anforderung 2 ergeben sich wiederum weitere Teilfragestellungen.

Teilfrage 3: Wie lässt sich ein aktuelles Mengengerüst der Ressourcen, bestehend aus hierarchischer Planungsstruktur und Ressourcen, vollständig erstellen?

Teilfrage 4: Wie können aktuelle Prozessinformationen - wie eine Stationsabfolge einzelner Fertigungsstationen - automatisiert generiert werden?

Teilfrage 5: Wie können einer fertigenden Ressource in einem Karosserierohbau aktuelle Produktinformationen, die zur Integrationsplanung erforderlich sind, automatisiert zugeordnet werden?

Anforderung 3: Die Methodik muss die Datenqualität gegenüber dem aktuellen bestehenden Planungsstand zur Produktionsanlage in der Datenqualitätsmetrik „Aktualität“ steigern. Daraus leitet sich folgende Teilfrage ab.

Teilfrage 6: Welche Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung kann im Hinblick auf die Aktualität durch einen Digitalen Zwilling erreicht werden?

Anforderung 4: Durch die Methodik ist Transparenz in den für Integrationsplanungen relevanten Informationen im Karosserierohbau sicherzustellen. Die Erzeugung von Transparenz soll einen Beitrag dazu leisten die „digitale“ Komplexität für die Planer bei einer Integrationsplanung beherrschbar machen. Hierfür soll es die zu entwickelnde Methodik ermöglichen, Änderungen der relevanten Informationen zu identifizieren. Aus dieser Anforderung zur Sicherstellung von Transparenz im Karosserierohbau ergeben sich weitere Teilfragen:

Teilfrage 7: Wie kann die Transparenz bei einer Integrationsplanung für die Planer sichergestellt und damit die digitale Komplexität verringert werden?

Teilfrage 8: Welche charakteristischen Änderungen hinsichtlich der Stammdaten (Ressourcen) und volatiler Daten (Produkt- / Prozessdaten) ergeben sich in einem Karosserierohbau während des Anlagenlebenszyklus?

Fazit:

Die Anforderungen und wissenschaftlichen Teilfragen zielen auf die Bereitstellung von Aktualität und Vollständigkeit relevanter Informationen für die Integrationsplanung ab. Eine zentrale Frage ist hierbei die Sicherstellung von Transparenz innerhalb der Produktion. Die Auseinandersetzung mit den wissenschaftlichen Teilfragen und den damit verbundenen Anforderungen dient als Basis zur Beantwortung der Forschungsleitfrage, wie ein Digitaler Zwilling die Datenqualität für Integrationsplanungen im Karosserierohbau automatisiert verbessern kann.

Im folgenden Kapitel sind die Grundlagen zur Konzeption der Methodik vorgestellt, die zur Beantwortung der oben dargestellten Teilfragen und den damit verbundenen Anforderungen an die zu entwickelnde Systematik genutzt werden.

3 Grundlagen des Digitalen Zwillings zur Verbesserung der Datenqualität im Karosserierohbau

Um den Karosserierohbau zu digitalisieren hat sich in den letzten Jahren das Konzept der „Digitalen Fabrik“ in der Automobilindustrie etabliert. Parallel dazu gab es einen enormen Fortschritt im Bereich der Automatisierungstechnik. Um den nächsten Schritt der Digitalisierung hin zum Digitalen Zwilling zu erreichen, sollen die vorhandenen Grundlagen genutzt werden. Deshalb beschäftigt sich dieses Kapitel mit dem Konzept der „Digitalen Fabrik“ als auch mit ganz neuen Ansätzen der Automatisierung im Karosserierohbau.

3.1 Ansätze für eine Digitale Fabrik

Zur Optimierung eines Produktionssystems hinsichtlich der Parallelisierung von Produktentwicklung und Planung in Kombination mit der Digitalisierung innerhalb des Planungsprozesses spielt das Konzept der Digitalen Fabrik bisher eine führende Rolle (VDI-Richtlinie 4499). WESTKÄMPER (Westkämper et al. 2013, S. 118) sieht den Hauptnutzen der Digitalen Fabrik in der Vermeidung von Planungsfehlern und einer Steigerung der Planungsqualität. Die Digitale Fabrik umfasst ein Konzept für digitale Modelle, Methoden und Werkzeuge (VDI-Richtlinie 4499 b). Abbildung 3-1 zeigt den Fokus der „Digitalen Fabrik“ im Strahlenkreuz der Unternehmensprozesse. Es wird deutlich, dass

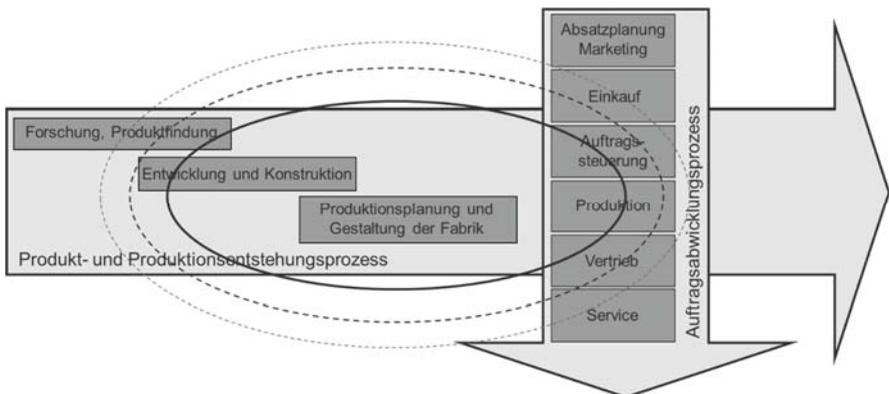


Abbildung 3-1: Fokus der Digitalen Fabrik im Strahlenkreuz der Unternehmensprozesse (VDI-Richtlinie VDI 4499)

sich die Konzepte der Digitalen Fabrik in der Regel auf die Produktionsplanung und Gestaltung einer Fabrik beziehen. Somit ist neben der Visualisierung und Simulation die Datenhaltung entlang des Produktlebenszyklus ein wesentlicher Bestandteil der Digitalen Fabrik (Dombrowski und Marx 2018, S. 71). Die Konzepte der Digitalen Fabrik verfolgen nach VDI 4499 (VDI-Richtlinie 4499 b) mehrere Teilziele. Ein für diese Arbeit relevantes Ziel ist die Standardisierung von Planungsprozessen und deren Ergebnisse. Erste Ansätze zur Standardisierung sind in der Automobilindustrie bereits umgesetzt (Walla 2015). Dazu gehören Planungsprozesse, Best-Practice-Lösungen und Modellbausteine (Schack 2008, S. 44). Das Konzept dieser Arbeit nutzt die aus der Digitale Fabrik kommenden Standards einer aus Modellbausteinen bestehenden digitalen Planungsbibliothek sowie des etablierten Datenaustauschformates AutomationML.

Standardisierte Planungsbibliothek

Innerhalb einer Produktionsplanung haben sich heute die Konzepte der Digitalen Fabrik zumindest teilweise etabliert. Ein bedeutendes Konzept der Digitalen Fabrik ist das einer standardisierten Planungsbibliothek (VDI-Richtlinie 4499 b). Beispielsweise werden zur Erzielung von Skaleneffekten im Einkauf vorab alle für den Karosserierohbau benötigten Anlagenkomponenten und deren Hersteller festgelegt. Die Planungsbibliothek bildet die Ressourcen ab, die zur Planung der Produktionsanlage verwendet werden dürfen. Auf Basis der Planungsbibliothek kann der Planer ein Mengengerüst der Ressourcen aufbauen (Dinse 2015, S. 42), (Hagemann et al. 2019, S. 162). Die Standardisierung der Betriebsmittel in den Gewerken erlaubt deren Einsatz in unterschiedlichen Standorten und bereitet die Grundlage für die Anwendung standardisierter Prozesse (Wittek 2013, S. 43).

Datenaustausch mit AutomationML

In der Praxis werden heute viele unterschiedliche Werkzeuge innerhalb der Planung und des Engineerings verwendet. Die daraus resultierenden Teilmodelle des Produktionssystems aus unterschiedlichster Perspektive führen zu Medienbrüchen zwischen den digitalen Modellen und vereiteln die Realisierung der Ansätze für eine ganzheitliche Planung (Schindler 2019). Ein Lösungsansatz aus dem Konzept der Digitalen Fabrik ist die Schaffung eines standardisierten Datenformats zum Austausch der Daten zwischen Planungssystemen und operativen Systemen (VDI-Richtlinie 4499 b). VYATKIN (Vyatkin 2013, S. 1238) bestätigt den Nutzen eines einheitlichen Datenformates hinsichtlich der Interoperabilität zwischen verschiedenen fertigungstechnischen Softwarewerkzeugen. VOGEL-HEUSER (Vogel-Heuser 2017, S. 37) beschreibt eine Vielzahl an Forschungsaktivitäten in Bezug auf standardisierte Datenformate und Standardschnittstellen

zwischen Softwaresystemen, die abhängig von der Anwendung mit unterschiedlich großem Erfolg umgesetzt wurden. SCHROEDER ET AL. (Schroeder et al. 2016, S. 12) schlagen zum Datenaustausch unter dem Blickwinkel des Digitalen Zwillings die Verwendung von AutomationML (AML) vor. Das Unternehmen Daimler AG initiierte die Entwicklung von AML zur Effizienzsteigerung in der Planung (Draht 2010, S. 38). Das Ziel des AutomationML-Konsortiums war, AML als offenes, lizenzfreies, herstellernerutrales und standardisiertes Datenformat zum Austausch von Anlagendaten zu entwickeln (ebd., S.41). Durch das festgelegte Datenformat lässt sich die Anzahl der Konverter reduzieren (ebd., S. 35). Abbildung 3-2 zeigt auf, wie die Anzahl der Konverter durch die Verwendung von AML prinzipiell verringert werden kann. AutomationML baut auf das CAEX-

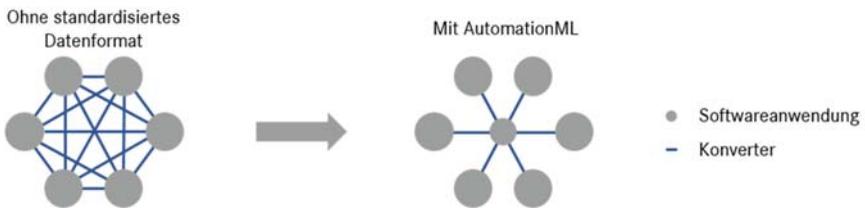


Abbildung 3-2: Reduktion von Konvertern durch die Verwendung von AutomationML in Anlehnung an (Draht 2010, S. 5)

Datenformat auf (Computer Aided Engineering eXchange) (Vyatkin 2013, S. 1238). CAEX erstellt ein anpassungsfähiges, objektorientiertes Metamodell zur Datenspeicherung, in dem Objektinformationen strukturiert und korreliert werden (ebd., S. 1238). Der objektorientierte Ansatz ermöglicht eine zusammenfassende Beschreibung physischer und logischer Anlagenkomponenten als Datenobjekte und ist in der Lage, Strukturen hierarchisch abzubilden (Lüder und Schmidt 2017, S. 224). Die bedeutendste Struktur ist die sogenannte „InstanceHierarchy“, da sie die Projektdaten beinhaltet (Draht 2012, S. 3). Ein weiterer Bestandteil des AML-Formates sind die „SystemUnitClassLib“, die „RoleClassLib“ und die „InterfaceClassLib“, durch die den Rohdaten entsprechende Rollen zugewiesen werden können (Lüder und Schmidt 2017, S. 226). Ebenso enthält AML mithilfe von Spiegelobjekten die Möglichkeit, unterschiedliche Gruppen- und Facettenkonzepte, sogenannte „Mirrors“ (ebd., S. 226) abzubilden. Das einheitliche Datenformat AML vereinfacht somit zusätzlich zum Datenaustausch das Ersetzen eines Softwarewerkzeuges durch ein anders (Rentschler und Drath 2018, S. 963). Der Einsatz von Methoden und Werkzeugen der Digitalen Fabrik hat in den letzten Jahren zu einer deutlichen Reduzierung von Konvertern beim Datenaustausch geführt (Bracht et al. 2011, S. 54). Dennoch werden aktuell die automatischen Generierungs- und Anpassungsoptionen nicht unterstützt (Hoang et al. 2018). Zusätzlich wird in

dieser Abhandlung der Ansatz verfolgt, Automatisierungskomponenten im Karosserierohbau zur automatisierten Aktualisierung digitaler Modelle zu nutzen.

3.2 Automatisierung im Karosserierohbau

Ein fundamentaler Forschungsansatz in der Automatisierungstechnik stellen heute sogenannte cyber-physische Systeme (CPS) dar. CPS können als eingebettete Systeme beschrieben werden, die in einem Kommunikationsnetzwerk miteinander kommunizieren und interagieren (Lee 2008), (Geiberger und Broy 2012). Die wesentliche Eigenschaft eines CPS ist die Verbindung physikalischer Geräte mit der digitalen Welt (Blecker et al. 2018, S. 177). Cyber-physische Systeme verfügen über Sensoren und Aktoren. Diese sind in der Lage sich ändernden Bedienungen anzupassen und Entscheidungen auf Basis einer eigenen „Intelligenz“ zu treffen (Verl et al. 2012, S. 643). Insbesondere spielen eingebettete Systeme in Kombination mit Sensoren eine zunehmend bedeutendere Rolle (Bordel et al. 2017, S. 156). Das CPS gilt heute als ein Schlüsselkonzept von Industrie 4.0 (Schroeder et al. 2016, S. 12). Durch das CPS soll die Integration, Anpassung und Ablösung von Anlagenkomponenten erleichtert werden (Um et al. 2017, S. 15908). Unter dem Aspekt Produktionssystem wird das CPS auch als cyber-physisches Produktionssystem, englisch „Cyber-physical Production System“ (CPPS) bezeichnet (Weyrich et al. 2017). Ein CPPS ist zudem durch einen hohen Vernetzungsgrad der Systeme untereinander und durch eine eigenständige intelligente Produktionseinheit gekennzeichnet (Bauernhansl et al. 2014, S. 143). Häufig werden im Zusammenhang mit dem CPS auch die Ablösung klassischer Steuerungsarchitekturen weg von speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) hin zu beliebiger Hardware verstanden (Vogel-Heuser 2017, S. 34). Abbildung 3-3 veranschaulicht die Auflösung der heute etablierten Steuerungsarchitekturen zu einer CPS-basierten Automation. Echtzeitkritische Steuerungen und

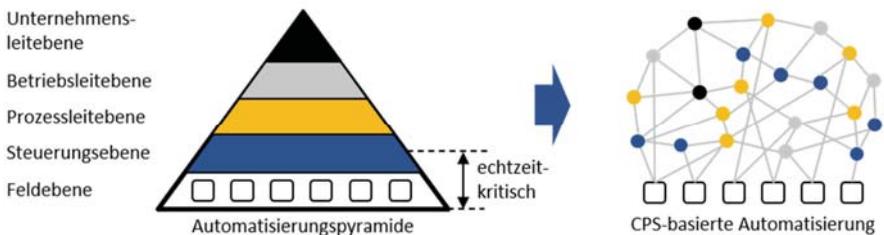


Abbildung 3-3: Auflösung der hierarchischen Automatisierungspyramide durch das CPS (Bettenhausen und Kowalewski 2013, S. 6)

Regelungen bleiben dennoch zunächst in der Feldebene (Bettenhausen und Kowalewski 2013, S. 6).

Die Integration neuer Anlagenkomponenten in ein bestehendes Produktionssystem stellt jedoch eine große Herausforderung dar, insbesondere der sichere Anlagenbetrieb über Jahrzehnte, wie es in einem Karosserierohbau gefordert wird (Vogel-Heuser 2017, S. 34). Hinzu kommt, dass sich bestehende Produktionssysteme nur in sehr wenigen Fällen mit vertretbarem Aufwand derart „smart“ aufrüsten lassen (Bauernhansl et al. 2016). Systemarchitekturen in bestehenden Produktionssystemen sind für Industrie 4.0-Konzepte teilweise nur bedingt geeignet (Andelfinger 2017, S. 4). Begrenzte Computer-Hardware-Ressourcen und fehlende Schnittstellen können die Möglichkeiten von CPS deutlich einschränken (Verl et al. 2012, S. 643). Somit ist die Industrie derzeit häufig noch etwas von derartigen Industrie 4.0-Ansätzen entfernt (Wibbe und Rohde 2017). Denn in der Praxis wird oft nicht angestrebt, das technische Potenzial voll auszuschöpfen, sondern es muss eine bestimmte Aufgabe zu niedrigen Kosten ausgeführt werden (Arntz et al. 2020, S. 44). Die meisten Produktionssysteme werden deshalb heute nach der bewährten klassischen Automatisierungspyramide gesteuert (Burger et al. 2017, S. 57). In der Automatisierungspyramide sind eingebettete Systeme als rechnerische Komponenten auf bestimmte Aufgaben zugeschnitten und haben feste Programme implementiert (Verl et al. 2012, S. 644). Eine besondere Rolle in der Steuerung nimmt die SPS ein. Sie steuert Sensoren und Aktoren sowie dezentrale Steuerungsmodule (Vyatkin 2013, S. 1235), (Bök et al. 2020, S. 347). Im Karosserierohbau zählen dazu auch Roboter, die wiederum ihre eigene Peripherie steuern. Die Verbindung zwischen den Anlagenkomponenten erfolgt meist festverdrahtet über Leitungen (Wegener 2019, S. 79). Auch wenn die Automatisierungspyramide im Karosserierohbau noch nicht aufgelöst ist, sind dennoch eingebettete Systeme enthalten, die miteinander kommunizieren und interagieren. Zusätzlich ist ein steigender Softwareanteil in Anlagenkomponenten in der Produktion zu verzeichnen (Eigner et al. 2017, S. 3). So hat die Automatisierungsindustrie mit ihren Produkten, wie speicherprogrammierbaren Steuerungen, Feldbussystemen und Antriebstechnologien, zwischenzeitlich einen hohen Reifegrad erreicht (Weyrich et al. 2017, S. 170). Es gibt verschiedene Systeme zur Datenerfassung, die Maschinensteuerungen nutzen (Kunath und Winkler 2019, S. 271).

Lösungsvorschläge zur Identifikation von Anlagenkomponenten im Produktionssystem

„Process Field Network“ (PROFINET) ist ein weitverbreitetes Protokoll in industriellen Produktionsanlagen, das zur Prozessdatenübertragung auf den Ethernet-Standard zurückgreift (Kellermeier et al. 2018, S. 40), (Bök et al. 2020, S. 362). Zur Untersuchung der Netzwerkteilnehmer in industriellen Produktionsnetzwerken eignen sich beispielsweise Netzwerkanalyse-Softwarewerkzeuge (Cupek et al. 2009, S. 242). Der sogenannte Manufacturing Service Bus (MSB) ist ebenfalls ein sich immer mehr etablierendes Echtzeitsystem, das sich zur Identifikation aktueller

Anlagenkomponenten eignen kann (Schel et al. 2018, S. 180). Der MSB besteht aus drei Ebenen: Die unterste Ebene bindet Maschinen und Anlagenkomponenten mit unterschiedlichen Protokollen ein. Die mittlere Ebene, der eigentliche Bus, ist für die Kommunikation zwischen den Diensten, Maschinen und Anlagen verantwortlich. Die oberste Ebene ist für die Ausführung der Dienste zuständig (Bauernhansl et al. 2014, S. 368). Der Bus ist ein sogenannter „Message Transformator“, der die Anbindung vieler verschiedener Technologien vorsieht (ebd., S.368). Abbildung 3-4 veranschaulicht den Manufacturing Service Bus als Kommunikationsmedium zwischen den Anlagenkomponenten in der Produktion. Der MSB eignet sich zur flexiblen Verarbeitung von Events

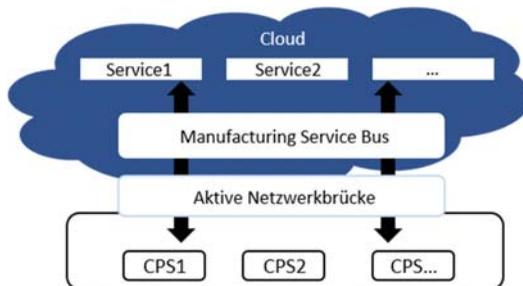


Abbildung 3-4: Integrationstechnologie - MSB (Burger et al. 2017, S. 63)

und löst die Schnittstellenverträglichkeit unterschiedlicher Technologien, dabei dient er als flexible Kommunikationsverbindung innerhalb der Produktion (Silcher 2014), (Minguez 2013, S. 276). Eine weitere Informationsquelle innerhalb der Produktion sind Konfigurations-Back-ups. Um eine hohe Verfügbarkeit im Falle eines Systemausfalls und einem Datenverlust vorzubeugen, werden in regelmäßigen Zyklen Back-ups von Daten aller Anlagenkomponenten im Produktionssystem gemacht, um eine einfache Wiederherstellung zu ermöglichen (Grünendahl et al. 2017, S. 54).

3.3 Zwischenfazit zur Digitalen Fabrik und zur Automatisierung im Karosserierohbau

Die Konzeption der Methodik nutzt bestehende Konzepte der „Digitalen Fabrik“ wie eine standardisierte Planungsbibliothek und das einheitliche Datenaustauschformat AutomationML. Ebenso wird die Automatisierungstechnik im Karosserierohbau für die Entwicklung der Methodik zur Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung genutzt. In der Regel erfolgt die Automatisierung im Karosserierohbau heute noch über eine hierarchische Automatisierungspyramide. Dennoch sind bereits wesentliche Gesichtspunkte des CPS wie eine Vielzahl an eingebetteten Systemen, die miteinander kommunizieren und interagieren sowie ein steigender Softwareanteil innerhalb der Anlagenkomponenten vorzufinden.

4 Konzeption – Digitaler Zwilling zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau

In der Industrie wird heute vor einer Integrationsplanung eine manuelle Bestandsaufnahme einer Anlagenstruktur und von den Ressourcen einer Anlage durchgeführt. Die manuelle Bestandsaufnahme des Mengengerüsts der Ressourcen ist fehleranfällig sowie zeitaufwendig und daher kostenintensiv. Transparenz in der Stationsabfolge sowie Informationen über das Fahrzeugmodell und -variante, an der ein Roboter arbeitet, sind häufig nicht gegeben. Ebenso liegen oft keine aktuellen Informationen über die Fügepunkte, mit denen eine Roboter verschiedene Fahrzeugteile zusammenfügt, vor. Nach einer Umfrage mit 22 Planungsexperten eines internationalen Automobilunternehmens sind die positiven Auswirkungen des Begriffes „Transparenz“ für eine Integrationsplanung unerlässlich. In diesem Kapitel werden die Konzeption und Ableitung der notwendigen systematischen Schritte für die Entwicklung einer Methodik zur Verbesserung der Datenqualität durch den Digitalen Zwilling beschrieben. Der Digitale Zwilling ist ein wesentlicher Bestandteil der Methodik. Die Definition des Digitalen Zwillings leitet sich aus den Beschreibungen von Candeo (Canedo 2016) und Klostermaier (Klostermeier et al. 2019, S.3) ab:

*Gemäß Canedo „[...] bewegt sich die Digital Twin-Technologie in Richtung der **Erstellung einer digitalen Repräsentation** eines Objektes der realen Welt mit Fokus auf das Objekt selbst“ (Canedo 2016).*

*„Der Digitale Zwilling definiert demnach **mindestens** das individuelle, virtuelle Abbild **eines physischen Objekts oder Prozesses**, welches die vom **physischen Objekt bereitgestellten Daten intelligent für verschiedene Anwendungsfälle nutzbar macht**“ (Klostermeier et al. 2019, S.3).*

Aus diesen Definitionen ergibt sich die Begriffsdefinition für diese Arbeit:

Der Begriff „Digitaler Zwilling“ steht mindestens für die Erstellung einer digitalen Repräsentation eines physischen Objektes oder Prozesses, durch die die vom physischen Objekt bereitgestellten Daten intelligent für Anwendungsfälle nutzbar gemacht werden.

Um die bereitgestellten Daten für eine Anwendung „intelligent“ nutzbar zu machen, soll die zu entwickelnde Methode das Problem selbstständig und effizient lösen (Mainzer 2016, S. 3).

Konzeption einer Methodik des Digitalen Zwillings zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau.

Eine Methodik setzt sich in der Regel aus mehreren Methodenkombinationen zusammen (Lindemann 2009, S. 71). Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik lässt sich durch vier Bausteine charakterisieren (Abbildung 4-1), die wiederum unterschiedliche Methoden enthalten.

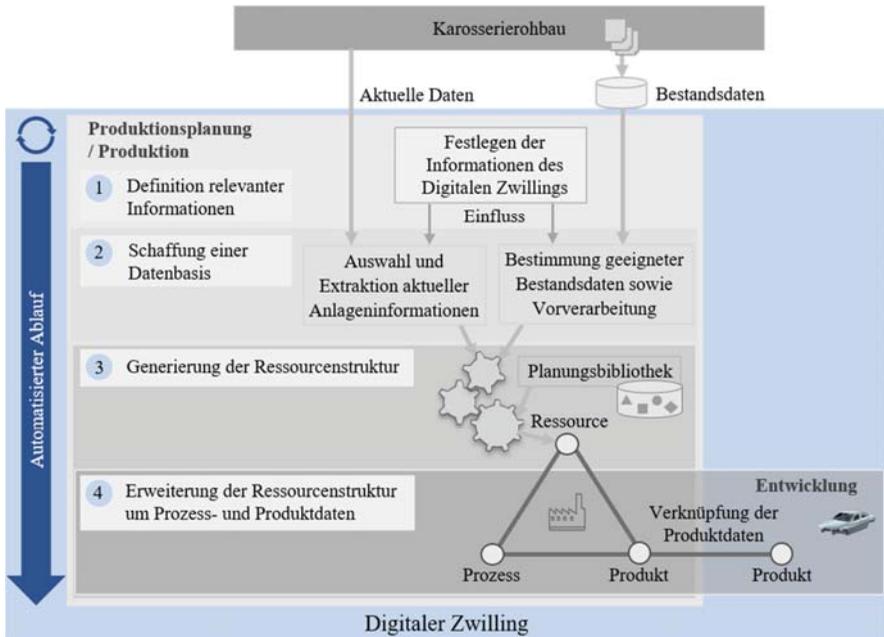


Abbildung 4-1: Methodik des Digitalen Zwillings zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau

Im ersten Baustein werden die relevanten Informationen definiert, die der Digitale Zwilling für die entsprechende Anwendung zur Verfügung stellen soll. Der zweite Baustein dient zur Schaffung einer geeigneten Datenbasis. Im dritten Baustein erfolgt die automatisierte Erstellung der Ressourcenstruktur. Im vierten Baustein werden die Ressourcen um die relevanten Prozess- und Produktinformationen erweitert. Diese vier systematischen Schritte dienen primär zur Steigerung der Datenqualität relevanter Ressourcen-, Prozess- und Produktinformationen für eine Anwendung zur Integrationsplanung im Karosserierohbau. Im Folgenden wird die Konzeption der vier Schritte näher erläutert. Der erste Methodenbaustein befasst sich mit der „**Definition relevanter Informationen**“ für die Anwendung des Digitalen Zwilling, die sich sowohl aus Anlagenkomponenten

(Ressourcendaten) sowie spezifischen Prozess- und Produktdaten zusammensetzen. Denn nur eine am tatsächlichen Bedarf ausgerichtete Digitalisierung der Produktion ermöglicht eine Realisierung der erhofften Vorteile (Jacobi und Landherr 2013, S. 44). Auch Schuh et al. (Schuh et al. 2017, S. 84) empfehlen, Informationen vorab so zu verarbeiten, zu filtern und zusammenzufassen, sodass ein Benutzer diese am Ende anwendungsgerecht erhält. Dieser Schritt macht den methodischen Ansatz generisch und gegebenenfalls auf weitere Anwendungsfälle (z. B. Wertstromanalyse, Instandhaltung) eines Digitalen Zwillings im Karosserierohbau übertragbar. Zugleich ist dieser Schritt essenziell, um die Anwendung der Methodik zur Erstellung des Digitalen Zwillings abzugrenzen, da sonst zu große Datensammlungen entstehen würden. Die Definition der relevanten Informationen des Digitalen Zwillings erlaubt es, die Methodik zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität „schlank“ zu konzipieren. Somit kann durch die Definition der relevanten Informationen die Komplexität bei der Anwendung der Methodik, insbesondere bezüglich des komplexen Produktionssystems Karosserierohbau verringert werden.

Damit ist die Definition der relevanten Informationen die Grundlage zur Bildung einer Datenbasis für den zweiten Baustein der Methodik. Da nun die relevanten Informationen des Digitalen Zwillings bekannt sind, kann die **„Schaffung einer Datenbasis“** ebenfalls schlank und zielgerichtet erfolgen.

Der zweite Baustein bildet so die Datengrundlage für die Methodik zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für Integrationsplanungen im Karosserierohbau. Um die *digitale Komplexität* hinsichtlich der Anwendbarkeit einer Methodik in der Industrie reduzieren zu können, müssen aus der Vielzahl der Daten die relevanten Informationen identifiziert und ausgewählt werden (Lager 2020, S. 273). Hierbei ist es entscheidend, die richtigen Bestandsdaten und aktuelle Daten aus der Produktionsanlage zielgerichtet zu bestimmen. Die relevanten Informationen, die der Digitale Zwilling für die Integrationsplanung abbilden soll, beeinflusst durch die jeweiligen Anforderungen maßgeblich die Auswahl der Daten und der Datenquellen. Somit prägen die Anforderungen *Automatisierbarkeit, Aktualität, Relevanz* und *Vollständigkeit* die Auswahl von Bestandsdaten und aktuellen Anlageninformationen. Gleichzeitig gilt es bei der Konzeption der Methodik darum, möglichst wenig und zugleich alle notwendigen Datenquellen zu verwenden, um die Komplexität hinsichtlich der Skalierung auf ein großes Produktionssystem gering halten zu können sowie um den automatisierten Ablauf zu vereinfachen. Zugleich müssen die relevanten Informationen für die Anwendung des Digitalen Zwillings abgedeckt werden.

Im dritten Baustein der Methodik findet die eigentliche **„Generierung der Ressourcenstruktur“** statt. Die Ressourcenstruktur, auch Mengengerüst der Ressourcen genannt, besteht aus einer

Anlagenstruktur und den dazugehörenden Anlagenkomponenten (Ressourcen). In dieser Phase erfolgt zunächst die automatisierte Generierung eines aktuellen und vollständigen Mengengerüsts der Ressourcen. Hierfür wird eine Methode entwickelt, die die aktuellen Informationen aus der Produktionsanlage mit den Bestandsdaten aus einer Planungsbibliothek verknüpft und diese hierarchisch in eine Planungsstruktur einordnet.

Im vierten Methodenbaustein verläuft die „**Erweiterung der Ressourcenstruktur um Prozess- und Produktdaten**“. In dieser Phase läuft eine Verknüpfung von Produktdaten zwischen der Produktionsanlage und dem entwickelten digitalen Produkt ab. Ebenso werden Prozessdaten mit der entsprechenden Ressource und der Station verknüpft.

Diese beschriebenen, aufeinander aufbauenden Methodenbausteine ermöglichen einen automatisierten Ablauf der Methodik. Die konzeptionierte Methodik besteht somit aus vier Bausteinen. In der konzipierten Methodik werden Bestandsdaten, aktuelle Daten der Produktion, eine Planungsbibliothek sowie Produktdaten aus der Entwicklung für den Digitalen Zwilling zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität zur Anwendung im Karosserierohbau genutzt.

5 Detaillierung der Methodik zur Anwendung bei der Integrationsplanung

Im Mittelpunkt dieser Abhandlung steht die Entwicklung des konzipierten Digitalen Zwillings für die Integrationsplanung für den Produktionsplaner als Anwender. **Die konzipierte Methodik soll zur Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau durch den Digitalen Zwilling dienen.** Anhand der Methodik soll der Komplexität im Karosserierohbau begegnet werden, indem eine Identifikation relevanter Informationen für die Anwendung der Integrationsplanung erfolgt. Anschließend wird gezielt für diese notwendigen Informationen eine Datenbasis geschaffen. Auf dieser Basis aufbauend erstellt die Methode zur automatisierten Generierung einer Ressourcenstruktur ein aktuelles Mengengerüst der Ressourcen des Produktionssystems. Darauf folgt die Erweiterung der Ressourcen innerhalb der Planungsstruktur um aktuelle Prozess- und Produktdaten aus der Produktionsanlage. Da derzeit oft nicht alle für die Integrationsplanung relevanten Informationen in der Software der Anlagenkomponenten einer Produktionsanlage im Karosserierohbau implementiert sind, ist ein zusätzlicher Schritt notwendig. Hierbei werden Produktinformationen aus der Fahrzeugentwicklung und der Produktionsanlage kombiniert und verarbeitet. Die in Kapitel 4 vorgestellte Methodik weist insgesamt vier Bausteine auf, die wiederum aus unterschiedlichen Methoden bestehen. Im Folgenden wird jeder dieser vier beschriebenen Bausteine der konzipierten Methodik für die Anwendung bei der Integrationsplanung detailliert erläutert.

5.1 Definition relevanter Informationen

Es stehen heute sehr viele unterschiedliche Digitale Zwillinge zur Verfügung, selbst in einem automobilen Karosserierohbau gibt es zahlreiche verschiedene Facetten eines Digitalen Zwillings (Biesinger und Weyrich 2019). Um den Digitalen Zwilling lösungsorientiert für die entsprechende Anwendung entwickeln zu können, erfolgt im ersten Methodenbaustein deshalb die „Definition relevanter Informationen“. Dabei wird festgelegt, welche Informationen der Digitale Zwilling als „Output“ zur Verfügung stellen muss. Für eine am Bedarf des Anwenders ausgerichtete Digitalisierung ist die Vorauswahl relevanter Daten entscheidend (Jacobi und Landherr 2013, S. 44), (Schuh et al. 2017, S. 84). Ohne die schlanke Ausrichtung der Methodik würde ein automatisierter Ablauf sowie eine Skalierung der Methodik auf ein komplexes Produktionssystem deutlich erschwert. Ein weiterer Faktor, der für eine schlanke Anwendung der Methodik spricht, in der nur relevante

Informationen enthalten sind, ist die Wirtschaftlichkeit. Nach Kühn (Kühn 2006) muss bezüglich der Anwendung einer Methodik in der Praxis zwischen Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit unterschieden werden. Er sieht deshalb ebenfalls die große Notwendigkeit in einer zielgerichteten Auswahl relevanter Daten. Die relevanten Informationen für die Integrationsplanung im Karosserierohbau, die der Digitale Zwilling bereitstellen soll, ergeben sich aus der Zielsetzung (vergl. Kapitel 1.3). Diese Informationen, die auch in der Zielsetzung formuliert sind, lassen sich aus der Literatur ableiten und wurden durch eine zur Literatur unabhängige Umfrage mit 22 Planungsexperten (Biesinger et al. 2019a) unter Vernachlässigung von bereits vorhanden Informationen bestätigt. Die vorhandenen Informationen schließen die bestehenden Konzepte und Lösungen ein (siehe Kapitel 1.2.). Der Digitale Zwilling muss deshalb die folgenden fünf Informationskategorien beinhalten (siehe auch Abbildung 1-3):

- Mengengerüst der Ressourcen,
- Stationsabfolgen (Vorgänger-/Nachfolgerbeziehungen einzelner Stationen),
- Fahrzeugmodelle und -varianten,
- Fügepunkte (z.B. Geo- oder Ausschweißpunkt) und
- Fahrzeugteile, die in den jeweiligen Stationen gefertigt werden.

Das Mengengerüst der Ressourcen umfasst die Struktur der Produktionsanlage sowie die darin enthaltenen Ressourcen. Diese Anlagenressourcen sollen bis auf die Sensorebene digital abgebildet werden, sodass beispielsweise jede Vorrichtung die korrekte Anzahl an Spannern enthält. Planer benötigen ein Mengengerüst der Ressourcen, damit sie wissen, welche Ressourcen in der bestehenden Anlage vorhanden sind. Hierbei bestimmt insbesondere die Anzahl der Roboter mit ihren Fertigungs-, Handlings- und Messfunktionen das Mengengerüst. Mit der Stationsabfolge werden die Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen der einzelnen Fertigungs- und Ablagestationen beschrieben. Diese Information zeigt dem Planer, wie der Fertigungsfluss in der Produktionsanlage zu gestalten ist. Sie ist damit eine wesentliche Entscheidungsgrundlage bei einer Integrationsplanung. Informationen zu Fahrzeugmodellen und -varianten, die von einem Roboter bearbeitet bzw. in einer Station gefertigt werden, sind ebenso relevant. Hierbei gilt es aufzuzeigen, in welcher Station welches Fahrzeugmodell und welche Fahrzeugvariante zu fertigen ist. Informationen zu den Fügepunkten sind ebenfalls von großer Bedeutung für die Integrationsplanung. Insbesondere die Anzahl der Fügepunkte, die ein Robotermodul fügt, haben für den Planer einen enormen Wert. Mit der Anzahl der Fügepunkte schätzt der Planer ab, inwieweit der Roboter ausgelastet ist sowie ob der Roboter ein neu zu integrierendes

Fahrzeugteil ebenfalls fertigen kann. Weiterhin ist beispielsweise beim Schweißen zu beachten, ob es sich um einen Geopunkt oder einen Ausschweißpunkt handelt. Geopunkte werden genutzt, um mehrere Fahrzeugteile zusammenzuheften. Anschließend können diese Fahrzeugteile durch Ausschweißpunkte weiter zusammengefügt werden. Darüber hinaus sind Informationen über den Zusammenbau der Fahrzeugteile in einzelnen Stationen sehr wertvoll. Denn damit werden für den Planer die aktuell vorhandene Fügefolge ersichtlich.

Um die relevanten Informationen eines Digitalen Zwillings erschließen zu können, hilft die Beantwortung der folgenden vier „W-Fragen“:

- Wer ist Nutzer des Digitalen Zwillings?
- Wozu wird der Digitale Zwilling eingesetzt?
- Was soll durch den Digitalen Zwilling erreicht werden?
- Welche Information soll der Digitale Zwilling enthalten?

Wie bereits ausgeführt, stehen in dieser Abhandlung als Anwender die Produktionsplaner im Fokus. Diese sollen den Digitalen Zwilling zur Integrationsplanung neuer Fahrzeuge in eine bestehende Produktionsanlage nutzen. In der Abbildung 5-1 sind die Aufgaben, das Ziel und der Informationsinhalt hellblau dargestellt. Die zu entwickelnde Methodik soll es ermöglichen, die



Abbildung 5-1: Festlegung der Anwendung des Digitalen Zwillings

Planungszeit für die Integration zu verkürzen und die Kosten der üblichen manuellen Bestandsaufnahme des Mengengerüsts der Ressourcen zu reduzieren. Zusätzlich soll Transparenz bezüglich der weiteren, für die Integrationsplanung benötigten Prozess- und Produktinformationen zur betreffenden Produktionsanlage geschaffen werden. Abbildung 5-1 zeigt außerdem weitere mögliche Anwender der Methodik, wie zum Beispiel einen Instandhalter, der die automatisierte

Methodik gegebenenfalls für vorausschauende Wartung nutzen kann. Ein anderer potenzieller Nutzer ist der Wertstrommanager, der die Methodik möglicherweise zukünftig zur schnelleren Ermittlung des Bestands und zur Darstellung des Wertstromes im Rahmen der Wertstromanalyse verwendet (Koch 2018, S. 32). Die Beantwortung der vier „W-Fragen“ ist in jedem Fall erforderlich, um die notwendigen Informationen zu fokussieren und damit die benötigten Datenquellen gering zu halten. Die Antworten beeinflussen somit maßgeblich die Auswahl von Bestandsdaten sowie der aktuellen Informationsquellen innerhalb des Produktionssystems.

5.2 Schaffung einer Datenbasis

In einem Karosserierohbau existieren viele verschiedene Datenquellen. Mit diesem Baustein der Methodik wird die Schaffung einer Datenbasis aufgegriffen, aus der ein Digitaler Zwilling die für eine Integrationsplanung relevanten Informationen automatisiert erzeugt und den Anwendern zur Verfügung stellen kann. Die Schaffung der Datenbasis erfolgt wiederum durch die Extraktion relevanter Daten aus ausgewählten Informationsquellen. Hierfür müssen die für den Anwender der Methodik relevanten Daten (Kapitel 5.1.) im Karosserierohbau sowie in den dazugehörigen Bestandsdaten identifiziert werden. Die Feststellung relevanter Daten aus einem großen Datenbestand, wie er im Karosserierohbau gegeben ist, ist ein bedeutender Schritt, um der digitalen Komplexität zu begegnen. Auf Basis der Bestimmung relevanter Daten und unter Berücksichtigung der Anforderungen kann anschließend die Auswahl geeigneter Informationsquellen erfolgen. Bei der Auswahl der Datenquellen ist zu berücksichtigen, dass möglichst wenige Informationsquellen genutzt werden. Denn je mehr verschiedene Datenquellen verwendet werden, desto mehr sind unterschiedliche Daten in verschiedenen Formaten einzubeziehen, was die Automatisierbarkeit und Skalierbarkeit der Methodik außerordentlich erschwert. Viele Datenquellen mit gegebenenfalls redundanten Daten beeinträchtigen den automatisierten Ablauf in der Praxis und machen die Umsetzung der Methodik fehleranfälliger. Wenige Datenquellen dagegen fördern einen fehlerfreien automatisierten Ablauf. Deshalb gilt bei der Auswahl der Datenquellen so wenige Datenquellen wie möglich, aber so viel wie nötig zu selektieren. Die Informationen im Karosserierohbau lassen sich in zwei Kategorien einteilen. Zum einen liegen Informationen aus den Automatisierungskomponenten der Produktionsanlage vor, deren Hauptmerkmal die *Aktualität* ist. Zum anderen sind digitale Bestandsdaten zum Produktionssystem vorhanden, deren Hauptmerkmal die *Vollständigkeit* ist. Für die Entwicklung einer Methodik zur automatischen Erstellung eines Digitalen Zwillings gilt es daher, die Stärken beider Informationsquellentypen (Aktualität und Vollständigkeit) zu vereinen. Im

Folgendes wird zunächst auf die Auswahl und Extraktion aktueller Anlagendaten eingegangen. Anschließend wird die Auswahl geeigneter Bestandsdaten vorgenommen.

5.2.1 Auswahl und Extraktion aktueller Informationen aus dem Produktionssystem

Die Identifikation von aktuell vorhandenen Anlagen, Maschinen und Geräten in der Produktion ist eine Grundvoraussetzung, um ein Mengengerüst der Ressourcen auf dem neusten Stand zu halten oder komplett neu zu erstellen (Biesinger et al. 2018c). Zugleich enthält der Karosserierohbau auch zahlreiche für eine Integrationsplanung relevante Prozess- und Produktinformationen. Damit der Nutzen der Digitalisierung möglichst hoch ist, muss ein Konzept zur Digitalisierung einer Produktion den in einem Unternehmen anzutreffenden Gegebenheiten Rechnung tragen (Jacobi und Landherr 2013, S. 44). Viele Digitalisierungskonzepte eignen sich heute häufig nur für neue Maschinen und Anlagen. Es besteht jedoch die Herausforderung, auch ältere Bestandsanlagen zu digitalisieren (Brenner 2018). Deshalb wurden im Rahmen dieser Arbeit auf bereits bekannte Ansätze zur Extraktion von Informationen aus einem Karosserierohbau zurückgegriffen sowie ein eigener neuer Ansatz entwickelt. Abbildung 5-2 zeigt zwei existierende Ansätze sowie ein in dieser Abhandlung entwickelter Ansatz zur Extraktion der relevanten Informationen aus einem Produktionssystem. Der

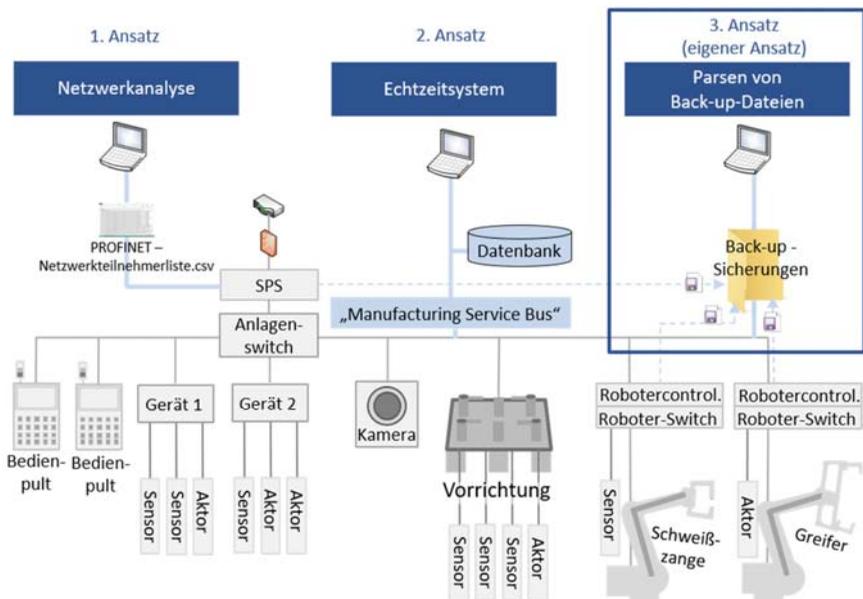


Abbildung 5-2: Ansätze zur Extraktion von Informationen aus dem Karosserierohbau

erste Ansatz besteht darin, eine Netzwerkanalyse durchzuführen. Diese ermöglicht es, Hardwareinformationen aller am Netzwerk angeschlossenen Anlagenkomponente im Karosserierohbau zu gewinnen. Eine Netzwerkanalyse kann beispielsweise mit einer PROFINET-Netzwerkanalyse erfolgen. Diese liefert aktuelle Informationen über das angeschlossene Gerät wie beispielsweise dessen IP-Adresse, MAC-Adresse, Hersteller und Softwareversion. Ein zweiter Ansatz ist, Informationen über ein Echtzeitsystem zu bekommen. Hierbei ist es möglich, Informationen direkt vom Roboter oder von einer SPS anzufordern. Ein Beispiel für das Echtzeitsystem ist der Manufacturing Service Bus (MSB) von IBM. Mit einem derartigen Echtzeitsystem könnten Nachrichten mit der SPS und dem Roboter ausgetauscht werden. Ein Nachteil bei der Verwendung des Echtzeitsystems ist die mögliche Erzeugung eines zu hohen Datenaufkommens auf dem Kommunikationsmedium, was Probleme bei der laufenden Produktion verursacht. In der Industrie erfolgt heute eine Zwischenspeicherung relevanter Informationen, die über den MSB ausgetauscht werden, auf einer Datenbank. Der Informationsinhalt einer Nachricht muss jedoch vorab im Roboter beziehungsweise einer SPS vorkonfiguriert werden. Die Offlinekonfigurationen von allen bedeutenden Steuerungen eines Produktionssystems sind aktuell auf Back-up-Servern oder Back-up-Laufwerken gespeichert. Ein dritter Ansatz, um an aktuelle Informationen aus der Produktion zu kommen, ist das Auslesen der Software- und Hardwareinformationen aus Offlinekonfigurationen von Steuerungen im Karosserierohbau. Die wesentlichen Steuerungen im Karosserierohbau sind heute speicherprogrammierbare Steuerungen und Robotersteuerungen. Abbildung 5-3 zeigt vereinfacht die Automatisierungskomponenten im Karosserierohbau. In der Konfiguration einer SPS sind alle von der SPS angesteuerten Anlagenkomponenten deklariert. Die SPS kommuniziert dabei ebenfalls mit den einzelnen Robotern. Die Roboter wiederum kommunizieren mit ihrer Peripherie. Die Peripherie eines Roboters ist ausschließlich in der Konfiguration des Roboters vorhanden. Im eigenentwickelten dritten Ansatz werden die Offlinekonfigurationen von SPS und Roboter geparkt. Parsen ist die Analyse unterschiedlichen Dateien nach deren Syntax und Informationen. Nach der Filterung der Informationen werden diese anschließend verarbeitet und aufbereitet. Das Parsen der Offlinekonfigurationen ermöglicht es gegenüber einer Netzwerkanalyse, weitere Informationen über die von einem Gerät angesteuerten Sensoren und Aktoren zu gewinnen. Zu diesen Daten der Hardware sind im eigenentwickelten Ansatz zusätzlich Prozess- und Produktinformationen in der konfigurierten Software der Anlagenkomponenten enthalten. Die Datenextraktion der Offlinekonfigurationen basiert auf den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Patent „Verfahren zum

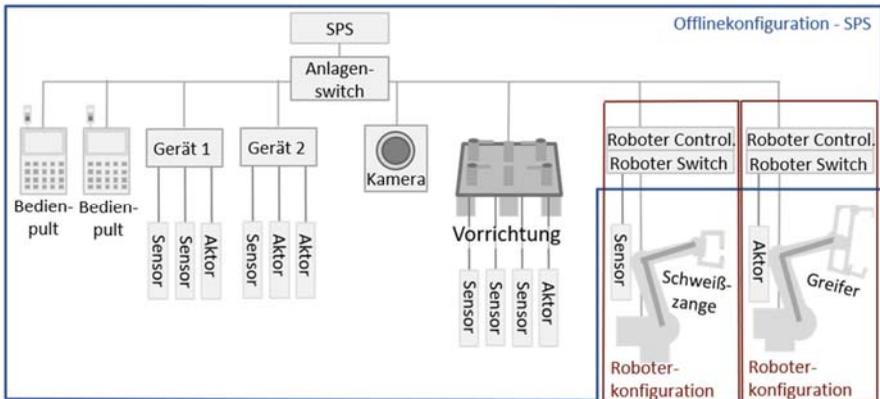


Abbildung 5-3: Informationen aus unterschiedlichen Offlinekonfigurationen

Ermitteln einer Konfigurationsänderung einer Produktionsanlage von Kraftwagen“ (Biesinger et al. 2018a). Ein Abgleich unterschiedlicher Datenstände der geparteten SPS- und Roboterprogramme ermöglichen eine schnelle und einfache Identifikation von Änderungen im Produktionssystem.

Bewertung der Informationsquellen hinsichtlich der Anforderungen

Gemäß den Anforderungen (vgl. Kapitel 2.3) an die Methodik findet in diesem Schritt die Bewertung der Informationsquellen im Karosserierohbau statt. Als Grundlage dieser Einschätzung dienen im Karosseriebau durchgeführte und bewertete Feldtests zur Datengewinnung. Eine Netzwerkanalyse erfolgte am Beispiel einer PROFINET-Analyse. Die Erprobung und Bewertung der Kommunikation eines Echtzeitsystems ist am Beispiel des Manufacturing Service Bus von IBM veranschaulicht. Das Auslesen von Offlinekonfigurationen ist im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Softwaredemonstrator realisiert. Die Bewertung der Datenquellen gemäß den Anforderungen ist in Tabelle 5-1 zusammengefasst. Bei allen drei Ansätzen gelingt es, hauptsächlich elektrische und mechatronische Anlagenkomponenten des Produktionssystems zu identifizieren. Da augenfällig mechanische Anlagenkomponenten auch keinen Mikrocontroller besitzen, kann deren Identifikation zunächst nicht erfolgen. Die Durchführung der Netzwerkanalyse im Rahmen des Feldtests im Karosserierohbau ist heute ausschließlich vor Ort an der Produktionsanlage realisierbar. Aufgrund von Firewalls ist keine dezentrale Steuerung über eine Serverapplikation möglich. Zusätzlich muss die Netzwerkanalyse an jeder SPS separat durchgeführt werden, was die Skalierung auf ein großes Produktionssystem erschwert. Der Feldtest zeigt außerdem, dass bei einer Netzwerkanalyse die Gefahr besteht, den Produktionsbetrieb zu stören.

Tabelle 5-1: Bewertung der derzeitigen Informationsquellen im Karosserierohbau

	Anwendung			Vollständigkeit Inhalt				
	Skalierung auf ein großes Produktionssystem	Automatisierung	Vermeidung einer Störung im Produktionsbetrieb	Mengengerüst der Ressourcen	Stationsabfolge	Fahrzeugmodelle und -varianten	Fügestpunkte	Zusammenbau der Fahrzeugteile
Netzwerkscan	-	o	-	o	-	-	-	-
Offlinekonfiguration	+	+	+	+	o	+	+	o
Echtzeitsystem	+	+	o	o	-	+	+	o

Legende:
 + geeignet
 o teilweise geeignet
 - ungeeignet

Eine hohe Netzwerkauslastung mit IP-Kommunikation verursacht zudem unbestimmte Latenzzeiten über die gesamte Netzwerkstruktur (Kellermeier et al. 2018, S. 40). Inhaltlich ist eine Netzwerkanalyse hinsichtlich relevanter Informationen für die Integrationsplanung ebenfalls eine eher ungeeignete Informationsquelle. Lediglich für ein Mengengerüst der Ressourcen sind die Informationen teilweise nutzbringend, da die Netzwerkanalyse eine lange Liste von sich am Netzwerk befindenden elektronischen und mechatronischen Anlagenkomponenten erstellt. Diese Informationen sind jedoch nicht vollständig, da Sensor- und Aktor-Informationen zu den Anlagenkomponenten fehlen. Offlinekonfigurationen der Steuerungen sind dagegen deutlich passender für die praktische Anwendung. Denn das Auslesen der Offlinekonfigurationen ist auf große Produktionsbereiche sehr gut skalierbar. Der entwickelte Ansatz und dessen Umsetzung mittels Softwareapplikation eignen sich für die Generierung der notwendigen Informationen aus der Ferne (Cloud, Büro oder Homeoffice). Da beim Auslesen der Konfigurationen kein direkter Zugriff auf die produzierenden Anlagenkomponenten im Karosserierohbau stattfindet, entsteht nicht die Gefahr einer Störung des Produktionsbetriebes durch die neue Softwareanwendung. Inhaltlich bietet das Auslesen der Steuerungskonfigurationen ebenfalls eine wesentliche Grundlage für die benötigten Informationen. Durch den entwickelten Ansatz zum Auslesen der Offlinekonfigurationen ist das Auslesen umfangreicher Ressourceninformationen als auch Prozess- und Produktinformationen möglich. So werden beispielsweise detaillierte Geräteinformationen mit Informationen zu allen installierten Sensoren und Aktoren bei den Ressourceninformationen ausgelesen. Lediglich relevante Informationen zu Fahrzeugteilen sind im Karosserierohbau nur teilweise vorhanden. Hinsichtlich der praktischen Anwendung hat der Feldtest am Beispiel des MSB gezeigt, dass sich das Echtzeitsystem ebenfalls gut zur Automatisierung und Skalierung auf ein großes Produktionssystem eignet. So erlaubt der getestete Manufacturing Service Bus Informationen direkt vom Roboter an die prototypisch implementierte Softwareanwendung zu senden. Im Feldtest kamen jedoch nur kleine

Nachrichten zum Einsatz, deren Empfang keine Probleme darstellte. Fachgespräche mit Industrieexperten ergaben aber, dass große Datenmengen auf dem MSB die Kommunikation im Produktionssystem stören können. Der Transport von aktuellen Konfigurationen des Roboters und der SPS ist prinzipiell möglich, jedoch entstehen dadurch große Datenmengen auf dem MSB. Somit ist es zwar möglich, den benötigten Informationsgehalt ebenfalls über den MSB zur Verfügung zu stellen, jedoch ist ein separates Parsen der Konfigurationen trotzdem notwendig. Somit ist die bedenkenlosere und komfortablere Lösung das direkte Parsen der Konfigurationen von den Back-up-Dateien. Daher ist im Rahmen dieser Arbeit die Erfolg versprechende Wahl das Auslesen der Offlinekonfigurationen, die als Back-up-Daten zur Verfügung stehen.

5.2.2 Bestimmung geeigneter Bestandsdaten

Während des Anlagenlebenszyklus einer Produktionsanlage im Karosserierohbau häufen sich viele unterschiedliche Bestandsdaten an, die oft als sogenannte Dateninseln auf einem Laufwerk liegen. Dort werden sie entweder nur manuell oder aber gar nicht aktualisiert. Dennoch enthalten diese Bestandsdaten zum Teil sehr detaillierte und entscheidende Informationen. Je nach Anwendung haben unterschiedliche Bestandsdaten des Karosserierohbaus Potenzial, um detaillierte Informationen für einen Digitalen Zwilling bereitzustellen. Eine nahe liegende Datenquelle ist zunächst ein Planungsstand zur Produktionsanlage. Während der Engineering-Phase, die durch einen externen Anlagenlieferanten erfolgt, kommen die Robotersimulation, eine Elektrik-Planung und die Stücklisten hinzu. Zusätzlich wird vom Anlagenlieferant eine Liste mit Fügepunkt- und Fahrzeugteilzuordnung zu jedem Roboter im Produktionssystem, auch „Rohbaudokumentation“ genannt, an das Automobilunternehmen übergeben. Je nach Nutzer und Anwendung qualifizieren sich unterschiedliche Bestandsdaten als geeignete Informationsquelle für einen Digitalen Zwilling. Im Folgenden wird das **Bewertungsschema für den Anwendungsfall der Integrationsplanung** vorgestellt. Da Bestandsdaten aus der Anwendung kommen, sind sie in der Regel gut skalierbar, automatisierbar und es besteht keine Gefahr einer Störung im laufenden Betrieb. Problematisch sind Bestandsdaten dagegen im Hinblick auf deren *Aktualität* und teilweise auf deren *Vollständigkeit* für die Integrationsplanung relevanten Informationen zu bewerten. Die Bewertung der *Vollständigkeit* und *Aktualität* der Bestandsdaten wurden für die aufgeführten Informationsquellen am Beispiel von mehreren Produktionsanlagen im Karosserierohbau durchgeführt. Das Resultat der Bewertung wird in Tabelle 5-2 dargestellt. Der Planungsstand ist mit Blick auf die *Aktualität* als Datenquelle zur Verbesserung der Datenqualität eines Digitalen Zwillings ungeeignet. Bezüglich der *Vollständigkeit* können alle relevanten Informationen des Planungsstandes vorhanden sein.

Tabelle 5-2: Bewertungsschema für Bestandsdaten im Karosserierohbau als Informationsquelle

Legende: + geeignet o teilweise geeignet - ungeeignet	Aktualität			Vollständigkeit relevanter Informationen				
	Planung	Start der Produktion	Laufende Produktion	Mengengerüst der Ressourcen	Stationsabfolge	Fahrzeugmodelle und -varianten	Fügestpunkte	Zusammenbau der Fahrzeugteile
Planungsstand	+	-	-	+	-	-	-	-
Konstruktion		+	o	-	-	-	-	-
Elektrik Planung		+	o	o	-	-	-	-
Stückliste		+	o	+	-	-	-	-
Robotersimulation		+	o	+	o	+	+	+
Rohbaudokumentation		o	-	o	-	+	+	+

Im untersuchten Planungsstand war dies jedoch nicht der Fall. Hier war lediglich das Mengengerüst der Ressourcen enthalten. Die Elektrik-Planung wäre in Bezug auf die *Aktualität* zwar teilweise verwendbar, jedoch sind die benötigten Informationen größtenteils nicht repräsentiert. Die Stückliste besitzt sehr viele relevante Informationen für das Mengengerüst. In der Robotersimulation existieren weitere Informationen zum Mengengerüst wie Konstruktionsnummern, Positionen für ein digitales Layout, aber auch Informationen zu Fahrzeugmodellen, Fügestpunkten und Fahrzeugteilen, die in der Anlage gefertigt werden. Eine Rohbaudokumentation umfasst dagegen nur Informationen über die Roboter, Fahrzeugmodelle, Fügestpunkte und den Zusammenbau der Fahrzeugteile. Die *Aktualität* müsste bei der Rohbaudokumentation zwar gleich wie bei der Stückliste und der Robotersimulation sein, jedoch offenbaren die untersuchten Datenstände, dass die Datenqualität der von Anlagelieferanten übergebenen Daten hier schlechter ist. Aus der Bewertung der Bestandsdaten geht hervor, dass Daten aus der Robotersimulation am besten für die Integrationsplanung geeignet sind. Somit werden bei der weiteren Entwicklung der Methodik die Bestandsdaten aus der Robotersimulation als Datenquelle verwendet.

5.3 Generierung der Ressourcenstruktur

Der dritte Baustein der Methodik, die Generierung der Ressourcenstruktur (Abbildung 5-4), baut auf der erzeugten Datenbasis vom zweiten Baustein auf. Die Grundlage für die Generierung des Mengengerüsts der Ressourcen sind aktuelle Informationen, die aus den Offlinekonfigurationen der Anlagenkomponenten (AK) kommen sowie Bestandsdaten aus der Robotersimulation. Aus den Offlinekonfigurationen ist es möglich, detaillierte Ressourcen-, Prozess- und Produktinformationen zu extrahieren. Zunächst werden alle elektrischen Anlagenkomponenten ($AK_{elektrisch}$) und mechatronischen Anlagenkomponenten ($AK_{mechatronisch}$) identifiziert, diese stellen die

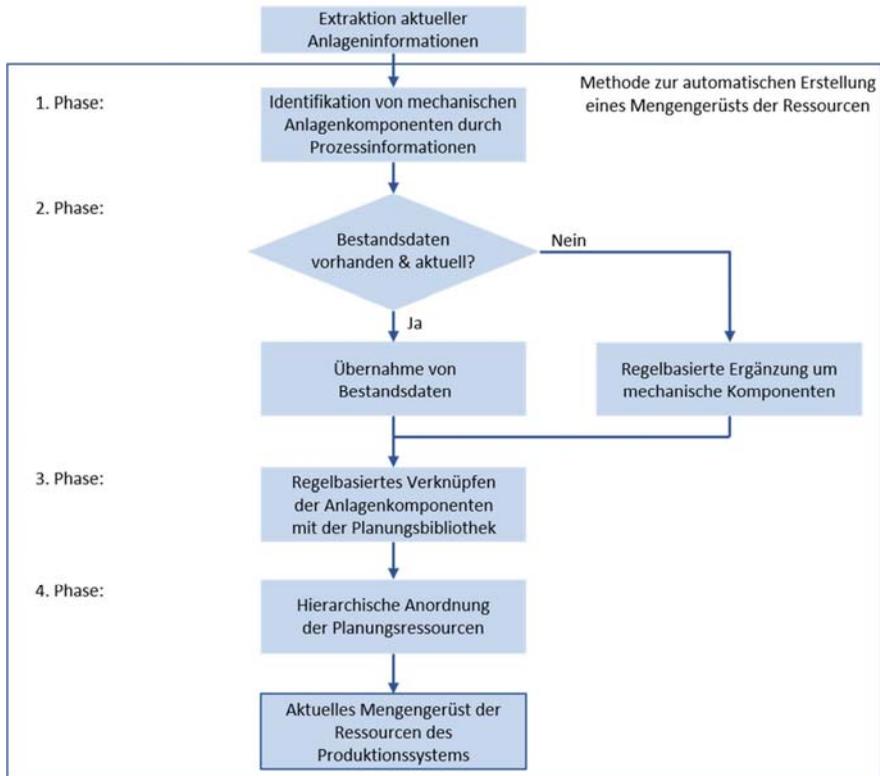


Abbildung 5-4: Methode zur automatischen Erstellung eines Mengengerüsts der Ressourcen

Komponenteninformationen dar. Darauf aufbauend erfolgt die „Methode zur automatischen Erzeugung eines Mengengerüsts der Ressourcen“ einer Produktionsanlage. Im Folgenden sind die einzelnen Phasen der Methode detailliert beschrieben und der Ablauf ist in Abbildung 5-4 abgebildet. Die Methode lässt sich dabei in vier Phasen unterteilen. Die erste Phase dient dazu, die Informationen zu den mechanischen Anlagenkomponenten mithilfe von Prozessinformationen zu vervollständigen. In der zweiten Phase erfolgt eine Prüfung der Bestandsdaten auf deren *Aktualität*. Für den Fall, dass die Bestandsdaten aktuell sind, ist es möglich, diese für den Digitalen Zwilling zu übernehmen. Im Fall, dass die Bestandsdaten veraltet sind, werden die elektrischen und mechatronischen Anlagenkomponenten mit einem regelbasierten Ansatz um dazugehörige mechanische Anlagenkomponenten ergänzt. In der dritten Phase erfolgt eine Verknüpfung der aktuellen Anlagenkomponenten mit der Ressourcen-Planungsbibliothek. Die vierte Phase dient zur

hierarchischen Anordnung der einzelnen Planungsressourcen in einem Mengengerüst der Ressourcen, wie es die Planer als Planungsprojekt aufbauen.

5.3.1 Phase 1: Identifikation mechanischer Anlagenkomponenten

In der ersten Phase werden Ressourceninformationen durch Prozessinformationen der Anlage vervollständigt. Hierbei ist es möglich, zusätzliche Informationen zu mechanischen Anlagenkomponenten aus Prozessinformationen zu nutzen, um die Ressourcendaten mit rein mechanischen Anlagenkomponenten $AK_{mechanisch}$ zu vervollständigen. Dies kann zum Beispiel ein mechanischer Ablagebehälter sein, von dem ein Handling-Roboter Fahrzeugteile aufnimmt oder ablegt. Durch die Prozessinformation „Fahrzeugteil auf dem Ablagebehälter“ ablegen, wird beispielsweise der charakteristische mechanische Ablagebehälter identifiziert. Jedoch sind durch die Prozessinformationen nur eine Teilmenge der mechanischen Anlagenkomponenten ($AK_{mechanisch_a}$) ermittelbar (siehe Abbildung 5-5). Nur wenn die mechanische Anlagenkomponente mit einem Roboterprozess in Verbindung steht, kann sie über dessen Prozessinformation im Roboterprogrammcode identifiziert werden.



Abbildung 5-5: Teilmenge mechanischer Anlagenkomponenten

Die in der ersten Phase identifizierten Anlagenkomponenten $\sum AK_{v1_identifiziert}$ ergeben sich somit aus der Summe elektrischer, mechatronischer und teilweise mechanischer Anlagenkomponenten ($AK_{mechanisch_a}$).

$$\sum AK_{v1_identifiziert} = \sum AK_{elektrisch} + \sum AK_{mechatronisch} + \sum AK_{mechanisch_a}$$

5.3.2 Phase 2: Prüfung der Aktualität von Bestandsdaten und regelbasierter Ansatz

In Phase 2 wird geprüft, ob Bestandsdaten vorhanden und diese aktuell sind. Bestandsdaten wie beispielsweise eine Robotersimulation (Engineering-Phase) eignen sich als bedeutende Informationsquellen. Wenn die entsprechenden Bestandsdaten Aktualität aufweisen, dann umfassen sie alle zur Anlage gehörenden mechanischen Anlagenkomponenten, die für ein Mengengerüst der Ressourcen benötigt werden. Die Robotersimulation enthält dabei zusätzlich Informationen wie Konstruktionsnummern oder die Positionen in einem digitalen Layout, deren Übernahme bei entsprechender *Aktualität* gegeben ist. Die im Folgenden abgebildete Vorgehensweise ermöglicht es,

veraltete und aktuelle Bestandsdaten zu erkennen (Biesinger et al. 2018c). Die Prüfung der Aktualität von Bestandsdaten und gegebenenfalls deren Übernahme erfolgt in der vorgegebenen Schrittfolge wie in Abbildung 5-6 dargestellt. Zuerst erfolgt die Ermittlung der Schnittmenge zwischen den

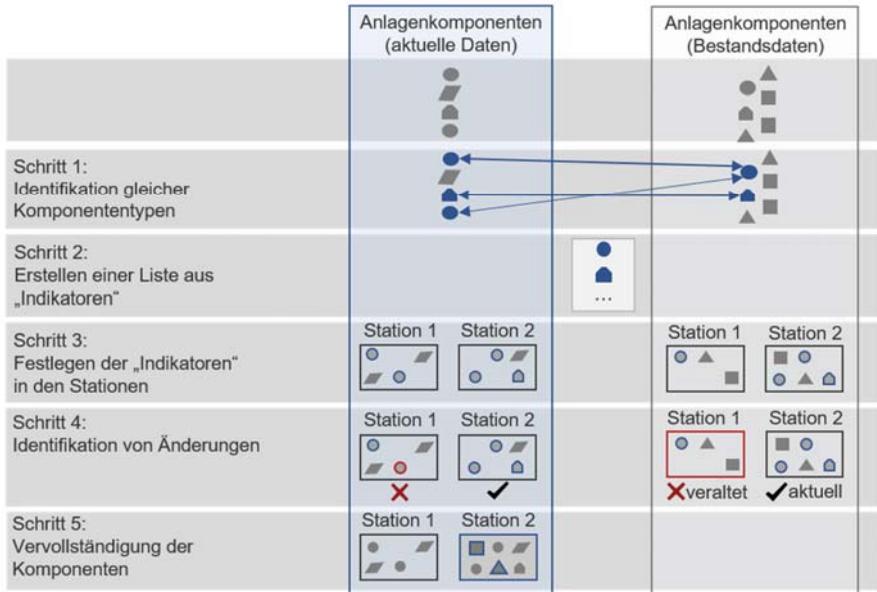


Abbildung 5-6: Identifikation von Änderungen zwischen Produktionssystem und Bestandsdaten

aktuellen Anlageninformationen und den Bestandsdaten. Diese Schnittmenge bilden hauptsächlich die mechatronischen Anlagenkomponenten. Dabei wird untersucht, welche Informationen sowohl in den aktuellen Anlageninformationen als auch in den jeweiligen Bestandsdaten vorkommen. Eine Identifikation gleicher Komponententypen kann beispielsweise mithilfe eines Abgleichs von Funktionsgruppen erfolgen. Anschließend ist es möglich, eine Liste der Komponententypen beziehungsweise der Funktionsgruppen zu generieren, die sowohl in den Bestandsdaten als auch in den aktuellen Anlagendaten vorkommen. Diese Komponententypen sind im Folgenden als sogenannte „Indikatoren“ bezeichnet. Diese Liste aus Indikatoren erlaubt es für alle Stationen in der Produktionsanlage sowohl in den aktuellen Daten als auch in den Bestandsdaten die jeweiligen Indikatoren zu markieren. Im vierten Schritt wird abgeglichen, ob alle Anlagenkomponenten, die zu der Komponentengruppe der Indikatoren gehören, ein dazugehörendes Gegenüber in den „aktuellen Daten“ aus der Produktionsanlage bzw. in den Bestandsdaten haben. Stimmen in einer Station alle

Indikatoren überein, hat kein für das Ressourcenmengengerüst relevanter Umbau in der Produktionsanlage stattgefunden und die aktuellen Daten können im fünften Schritt um fehlende Bestandsdaten ergänzt werden. Stimmt mindestens ein Indikator innerhalb einer Station nicht überein, hat dort ein Umbau an der Produktionsanlage stattgefunden. In diesem Fall sind die Bestandsdaten veraltet und sie sind somit nicht zur automatischen Erzeugung des Digitalen Zwillings geeignet. Bei Änderungen in der Produktion und fehlender *Aktualisierung* von Bestandsdaten sind diese nicht wiederverwendbar. In diesem Fall nutzt die Methode eine regelbasierte Erzeugung der fehlenden mechanischen Anlagenkomponenten. Hierbei gilt es, zusammenhängende Anlagenkomponenten zu identifizieren und darauf aufbauend Regeln zur Vervollständigung der Anlagenkomponenten abzuleiten (siehe Abbildung 5-7). Anschließend können fehlende (mechanische) Anlagenkomponenten auf Basis dieses regelbasierten Ansatzes automatisch generiert werden.

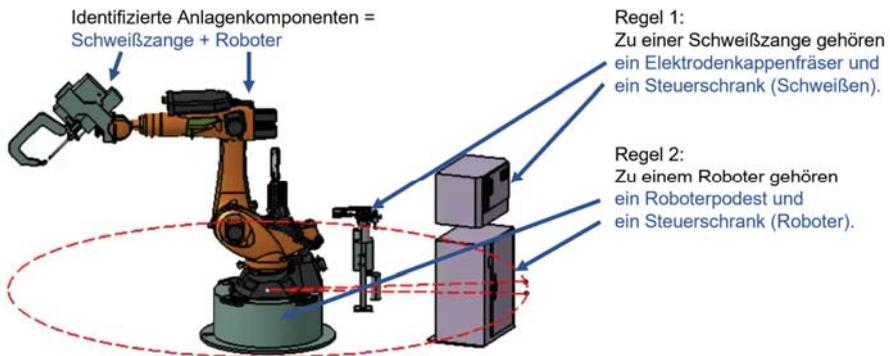


Abbildung 5-7: Vereinfachte exemplarische Darstellung des regelbasierten Ansatzes

Durch die regelbasierte Ergänzung um mechanische Komponenten ergibt sich wiederum die Summe aller Anlagenkomponenten. Hierbei ist es jedoch zusätzlich erforderlich, das Layout für den geänderten Teilbereich der Anlage automatisch zu rekonstruieren. Im Rahmen dieser Abhandlung wurde gemeinsam mit Braun et al. (Braun et al. 2021) eine Methode zur automatischen Layout-Rekonstruktion entwickelt, um dieser Herausforderung zu begegnen. Die identifizierten Anlagenkomponenten in Phase zwei ergeben sich aus den Anlagenkomponenten aus Phase 1 und mechanischen Anlagenkomponenten aus aktuellen Bestandsdaten oder alternativ aus dem regelbasierten Ansatz.

$$\sum AK_{v2_identifiziert} = \sum AK_{v1_identifiziert} + \sum (AK_{Bestandsdaten_mechanisch} \vee AK_{regelbasiert_mechanisch})$$

5.3.3 Phase 3: Verknüpfung von Anlagenkomponenten mit der Planungsbibliothek

Im dritten Vorgehensschritt werden die detaillierten Anlageninformationen mit standardisierten Anlagenkomponenten aus einer Planungsbibliothek verknüpft. Hierfür sind Regeln definiert, mit denen die Ressourcen aus der Planungsbibliothek den entsprechenden Anlagenkomponenten hinzugefügt werden. Zur Verbindung wird eine Zuordnung über Planungs-IDs genutzt. Hinter der ID in der Planungsbibliothek stehen zusätzliche Informationen wie beispielsweise die Kosten, was entscheidend für die Integrationsplanung ist. Auf Basis von festgelegten Regeln zur Definition eines Zusammenhangs zwischen den einzelnen Anlagenkomponenten ($AK_{V2_identifiziert}$) und den entsprechenden Ressourcen in der Planungsbibliothek ($Ressourcen_{Planungsbibliothek}$) erfolgt die Erzeugung der Planungsressourcen ($Ressourcen_{Produktionssystem}$). Somit ergibt sich die Summe der aktuell verbauten Planungsressourcen im Produktionssystem aus den identifizierten Anlagenkomponenten, deren Zusammenführung mit dem entsprechenden Gegenüber in der Planungsbibliothek möglich war.

$$Ressourcen_{Produktionssystem} = AK_{V2_identifiziert} \times Ressourcen_{Planungsbibliothek}$$

5.3.4 Phase 4: Hierarchische Anordnung der Ressourcen in ein Mengengerüst

Um ein Mengengerüst der Ressourcen zu erhalten, müssen die entsprechenden Ressourcen noch in eine Planungsstruktur gebracht werden. In Abbildung 5-8 ist die Erzeugung der Ressourcenstruktur am Beispiel eines Roboters exemplarisch dargestellt. Für die Generierung der Anlagenstruktur sowie der Anordnung der Ressourcen ist eine standardisierte Bezeichnung der einzelnen Ressourcen notwendig. Diese muss aktuell mindestens die Informationen über das Werk, die Produktionsanlage, den SPS-Bereich, die Stationsbezeichnung sowie eine individuelle Komponentenbezeichnung enthalten. Die Gerätebezeichnung muss dabei eindeutige Rückschlüsse auf die Ressource und deren Funktion zulassen. Die Abbildung zeigt, wie auf Basis dieser Informationen die Planungsstruktur generiert und die Ressource entsprechend angeordnet werden kann. Auf der linken Seite befinden sich – vereinfacht dargestellt – unterschiedliche Anlagenkomponenten, wie sie in einem Karosserierohbau anzutreffen sind. Somit ergibt sich ein aktuelles Mengengerüst der Ressourcen, das eine eminente Bedeutung bei einer Integrationsplanung hat.

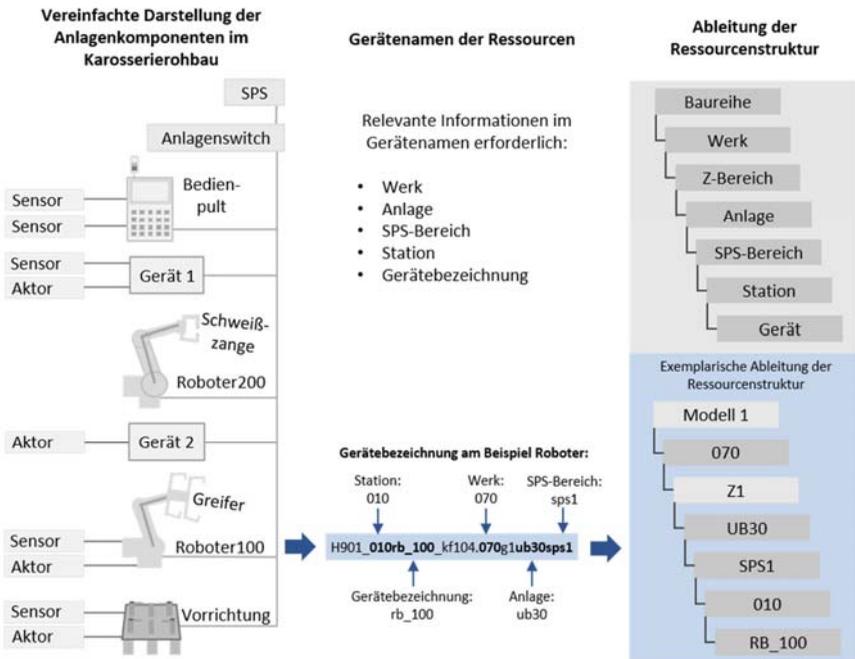


Abbildung 5-8: Ableitung einer Ressourcenstruktur aus den Komponenteninformationen

5.4 Erweiterung der Ressourcenstruktur um Prozess- und Produktdaten

Zum bestehenden aktuellen Ressourcenmengengerüst werden in diesem Abschnitt die relevanten Produkt- und Prozessinformationen verknüpft (siehe Abbildung 5-9). Da derzeit oft nicht alle relevanten Produktinformationen in der Software einzelner Anlagenkomponenten enthalten sind, werden die aus der Produktionsanlage extrahierten Produktinformationen zusätzlich mit Produktinformationen aus der Fahrzeugkonstruktion (Entwicklung) gekoppelt. Diese Kopplung der Produktinformationen zwischen Entwicklung (Soll) und Anlage (Ist) ermöglicht erstmals einen

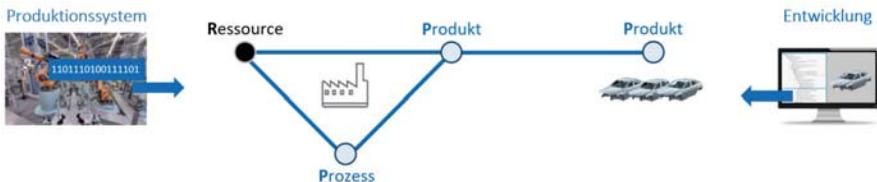


Abbildung 5-9: Erweiterung um relevante Produkt- und Prozessinformationen

größeren automatisierten Abgleich zwischen den Entwicklungsdaten und der eigentlichen Realisierung bei der Fertigung des Produktes im Produktionssystem. Die Erweiterung der Ressourceninformationen um die relevanten Prozess- und Produktinformationen wird im Folgenden angewandt. Je nach benötigter Information müssen die aus den Anlagenkomponenten extrahierten Informationen mit einer speziell entwickelten Methode verarbeitet werden, um die gewünschten Daten automatisiert zu generieren. Eine bedeutende Information für die Integrationsplanung ist die Stationsabfolge.

5.4.1 Automatisierte Generierung einer Stationsabfolge

Die Information einer Stationsabfolge ist als solche nicht in der Produktionsanlage enthalten. Im Folgenden wird deshalb eine Methode zur automatischen Generierung einer Vorgänger- und Nachfolgerrelation zwischen Stationen (Fertigungs- und Ablagestationen) in einer automatisierten Produktionsanlage vorgestellt. Zur Generierung der Stationsabfolge innerhalb von zusammenhängenden Produktionsanlagen werden Rohdaten aus Handhabungsgeräten „Handling-Roboter“ genutzt. Handling-Roboter (Roboter mit Greifer) übernehmen im Allgemeinen den Transport von Fahrzeugteilen und Teilkarosserien in einer automatisierten Produktionsanlage im Karosserierohbau. Abbildung 5-10 zeigt einen prinzipiellen und zugleich deutlich vereinfachten Aufbau eines automatisierten Produktionssystems und dessen Teilefluss. Die blau dargestellten Pfeile

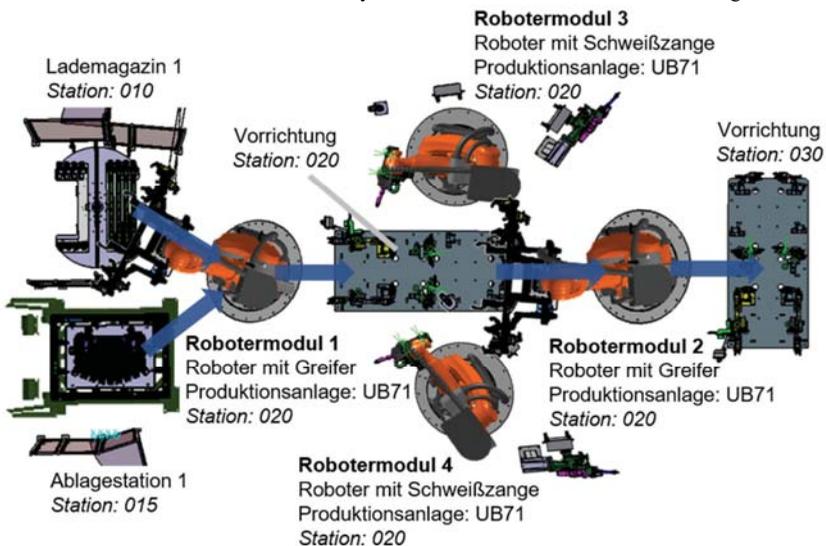


Abbildung 5-10: Vereinfachte Darstellung der Fertigungsabfolge einer Produktionsanlage

veranschaulichen die Fertigungsabfolge in der Produktionsanlage. In der exemplarischen Abbildung ist ein Teilefluss (blau) von links nach rechts zu erkennen. Dabei nimmt der Handling-Roboter (Robotermodul 1) Fahrzeugteile aus dem Lademagazin 1 sowie aus der Ablagestation 1 auf und legt diese auf die Vorrichtung von Station 020 ab. Auf der Vorrichtung von Station 020 erfolgt das Fügen von zwei Fahrzeugteilen durch das Robotermodul 3 und das Robotermodul 4 mit dem Fügeverfahren „Widerstandspunktschweißen“. Das daraus resultierende Fahrzeugteil wird vom Handling-Roboter (Robotermodul 2) in Station 020 aufgenommen und in die Fertigungsstation 30 abgelegt. Das Auslesen dieser Informationen war durch die Extraktion in Abschnitt 5.2 möglich und bildet die Rohinformation für diese Methode. In Abbildung 5-11 ist eine exemplarische Wiedergabe der Rohinformationen der entsprechenden Handling-Roboter 1 (HR 1) und Handling-Roboter 2 (HR 2) zu sehen. Die entwickelte Methode stützt sich auf eine standardisierte Gerätebezeichnung und Roboterprogrammierung in der Produktion, die als Rohinformationen aus den Robotern extrahiert werden (Abschnitt 5.2). Hierbei nutzt die Methode eine Standardisierung bei der Roboterbezeichnung, die vorgibt, dass Informationen über die jeweiligen Anlagenteile im Produktionssystem (zum Beispiel UB 71 = Unterbau, Anlage 71) in der Bezeichnung enthalten ist. Die standardisierte Bezeichnung muss im Gerätenamen ebenfalls Informationen über die jeweilige Station enthalten, zu der eine Anlagenkomponente gehört. Zusätzlich wird vorausgesetzt, dass sich die Roboterprogrammierung ebenfalls an standardisierte Vorgaben hält. Ein Robotersoftware Quellcode eines Handling-Roboters (Roboter mit Greifer) enthält Informationen über die Stationen, in denen der Roboter Fahrzeugteile aufnimmt und ablegt. Darauf aufbauend wird die Verarbeitung der Informationen durch die „Methode zur automatischen Identifikation einer Stationsabfolge im Karosserierohbau“ durchgeführt. Zur Generierung der Stationsabfolge innerhalb einer Produktionsanlage dienen Informationen aller Handling-Roboter in einer Anlage. Aus den Informationen aller Handling-Roboter ist es möglich, eine Vorgängerliste sowie eine Nachfolgerliste mit Informationen zum jeweiligen Handlings-Roboter zu erzeugen. Anschließend erfolgt ein Abgleich beider Listen nach gleichem Stationskürzel (siehe Abbildung 5-11). Hat beispielsweise der Handling-Roboter 1 die gleiche Station als Nachfolger (Fahrzeugteil ablegen), die der Handling-Roboter 2 als Vorgänger hat (Fahrzeugteil aufnehmen), ergibt sich daraus die Stationsabfolge. In diesem Beispiel ist der Handlings-Roboter 1 der Vorgänger zu Handling-Roboter 2. Aus den weiteren Informationen der Handlings-Roboter zur Aufnahme von Fahrzeugteilen (Vorgänger) und Ablage von Fahrzeugteilen (Nachfolger) wird der Stationsablauf innerhalb der Produktionsanlage ermittelt (siehe Abbildung 5-11). Durch dieses Prinzip lässt sich die Stationsabfolge einzelner

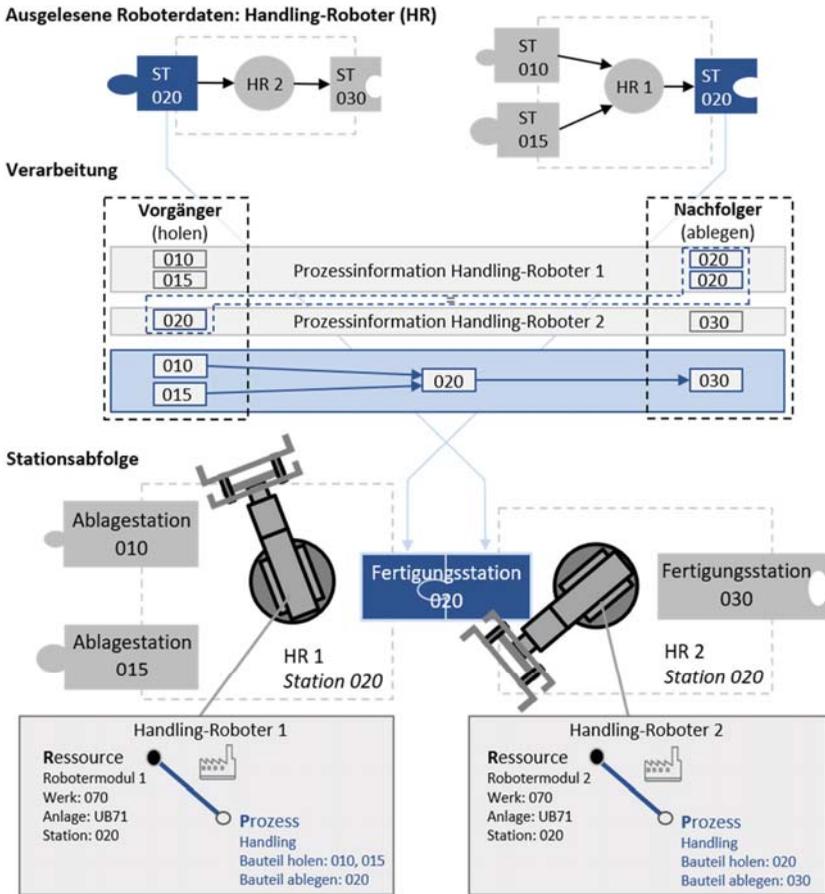


Abbildung 5-11: Prinzip zur Generierung der Stationsabfolge

Produktionsanlagen im Karosserierohbau ermitteln. Wegen des geringen Aufwandes zur Umsetzung sowie dem verhältnismäßig großen Informationswert, den die entwickelte Methode für die Integrationsplanung im industriellen Umfeld mit sich bringt, wurde die beschriebene Methode im Rahmen dieser Arbeit bereits als Patent unter der Patentbezeichnung „DE 10 2019 004 923 A1“ veröffentlicht (Biesinger et al. 2019b). Weitere für die Integrationsplanung relevanten Informationen stellen Fahrzeugmodelle und -varianten dar, deren Bearbeitung in einer jeweiligen Station beziehungsweise von einem Robotermodul erfolgt.

5.4.2 Informationsgenerierung für Fahrzeugmodelle und -varianten

Für eine zielführende Integrationsplanung benötigen Planer Informationen über die in einer Station beziehungsweise von einem Robotermodul gefertigten Fahrzeugmodellen und -varianten. Ein intelligentes Parsen der Roboterkonfigurationen erlaubt es, diese Information bereits als Rohinformation aus Robotersteuerungen zu extrahieren. In Abbildung 5-12 werden exemplarisch zwei Möglichkeiten zur Identifizierung der von einem Roboter zu bearbeiteten Fahrzeugmodelle und -varianten verdeutlicht.

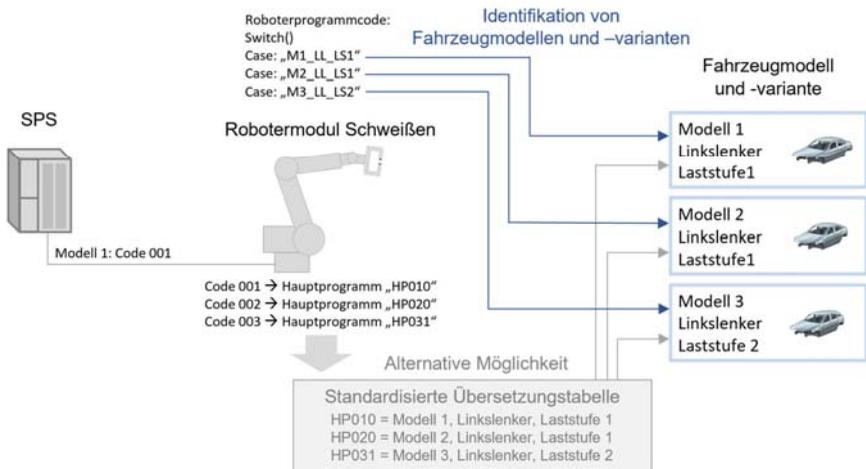


Abbildung 5-12: Identifikation von Fahrzeugmodell und -variante

Die naheliegendste Möglichkeit ist es, die benötigten Informationen über die Fahrzeugmodelle und -varianten aus den Switch-Case-Anweisungen im Roboterprogrammcode zu extrahieren. Hierbei ist es möglich, die Modellversion direkt aus dem jeweiligen „Case“ zu übernehmen. Falls im Roboterprogrammcode keine Switch-Case-Anweisungen vorhanden sind, muss die Methodik als Alternative eine standardisierte Übersetzungstabelle heranziehen, um aus den Roboterhauptprogrammen die entsprechenden Fahrzeugmodelle zu übersetzen. Aktuell steuert die SPS einen Roboter, dabei erteilt die SPS dem Roboter Befehle zur Fertigung unterschiedlicher Fahrzeugmodelle und -varianten. Eine Fahrzeugvariante ist auf Produktebene innerhalb der Produktion ebenfalls häufig als ein individueller Code definiert (Stich 2007, S. 30). Dieser individuelle Code findet sich im Hauptprogramm eines Roboters wieder, der für jedes Fahrzeugmodell und jede Variante individuell sein kann. Im Hauptprogramm sind wiederum

im Roboter enthalten ist. Darüber hinaus lassen sich durch die Kopplung der Daten detaillierte Informationen zum jeweiligen Prozess gewinnen. Die Kopplung der Produktinformationen ermöglicht außerdem einen Vergleich von Soll- und Ist-Positionen der Fügepunkte. Dadurch kann die Qualitätskontrolle des Anlagenlieferanten, ob alle Fügepunkte nach Vorgabe implementiert sind, erstmals automatisiert ablaufen. Die Kopplung zwischen den Produktdaten der Produktionsanlage und Produktdaten aus der Konstruktion erlaubt des Weiteren die Verknüpfung von Fahrzeugteilen mit der Produktionsanlage. Somit ermöglicht die Kopplung eine Identifikation, welche Fahrzeugteile an der jeweiligen Fertigungsstation zusammengefügt werden und welcher Zusammenbau sich daraus ergibt.

5.5 Zusammenfassende Darstellung der entwickelten Methodik

Die vorhergehenden Abschnitte von Kapitel 5 haben die systematische Detaillierung des Konzepts (Kapitel 4) für die Anwendung einer Integrationsplanung detailliert vorgestellt. Hierfür konnten die einzelnen Methoden, aus denen sich die Methodik zusammensetzt, aufgezeigt werden. Abbildung 5-14 fasst diese einzelnen Methoden in der „**Methodik eines Digitalen Zwillings zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau**“ zusammen. Die Abbildung gibt einen Überblick über die einzelnen Bausteine der Methodik und stellt diese in einer Strukturübersicht dar. Die einzelnen Bausteine entsprechen je einem Unterkapitel von Kapitel 5 und sind in der Abbildung hellblau dargestellt. Insgesamt besteht die entwickelte Methodik aus den vier Bausteinen „Definition relevanter Informationen“ (Unterkapitel 5.1.), „Schaffung einer Datenbasis“ (Unterkapitel 5.2.), „Generierung einer Ressourcenstruktur“ (Unterkapitel 5.3.) sowie „Erweiterung der Ressourcenstruktur um Prozess- und Produktdaten“ (Unterkapitel 5.4.). Nach dem Baustein „Definition relevanter Informationen“ folgt der Baustein „Schaffung einer Datenbasis“, der sich in die „Auswahl und Extraktion aktueller Anlageninformationen“ (Abschnitt 5.2.1) sowie in die „Bestimmung geeigneter Bestandsdaten“ (Abschnitt 5.2.2) aufteilt. Ein wesentlicher Baustein der entwickelten Methodik in Abbildung 5-14 ist die „Methode zur automatischen Erstellung eines Mengengerüsts der Ressourcen“ („b“ in grün dargestellt). Diese Methode besteht aus vier Phasen, die in den Abschnitten 5.3.1 bis 5.3.4 näher beschreiben sind. In Phase 1 erfolgt die Identifikation von mechanischen Anlagenkomponenten mithilfe von Prozessinformationen. Die zweite Phase „Prüfung der Bestandsdaten auf deren Aktualität“ (Abschnitt 5.3.2) umfasst fünf Ablaufschritte. Im letzten Ablaufschritt erfolgt eine Vervollständigung der Komponenten, hierbei ermöglicht der entwickelte Ansatz eine Unterscheidung von aktuellen und veralteten Bestandsdaten. Der Digitale Zwilling übernimmt hierbei lediglich aktuelle Bestandsdaten, veraltete werden nicht

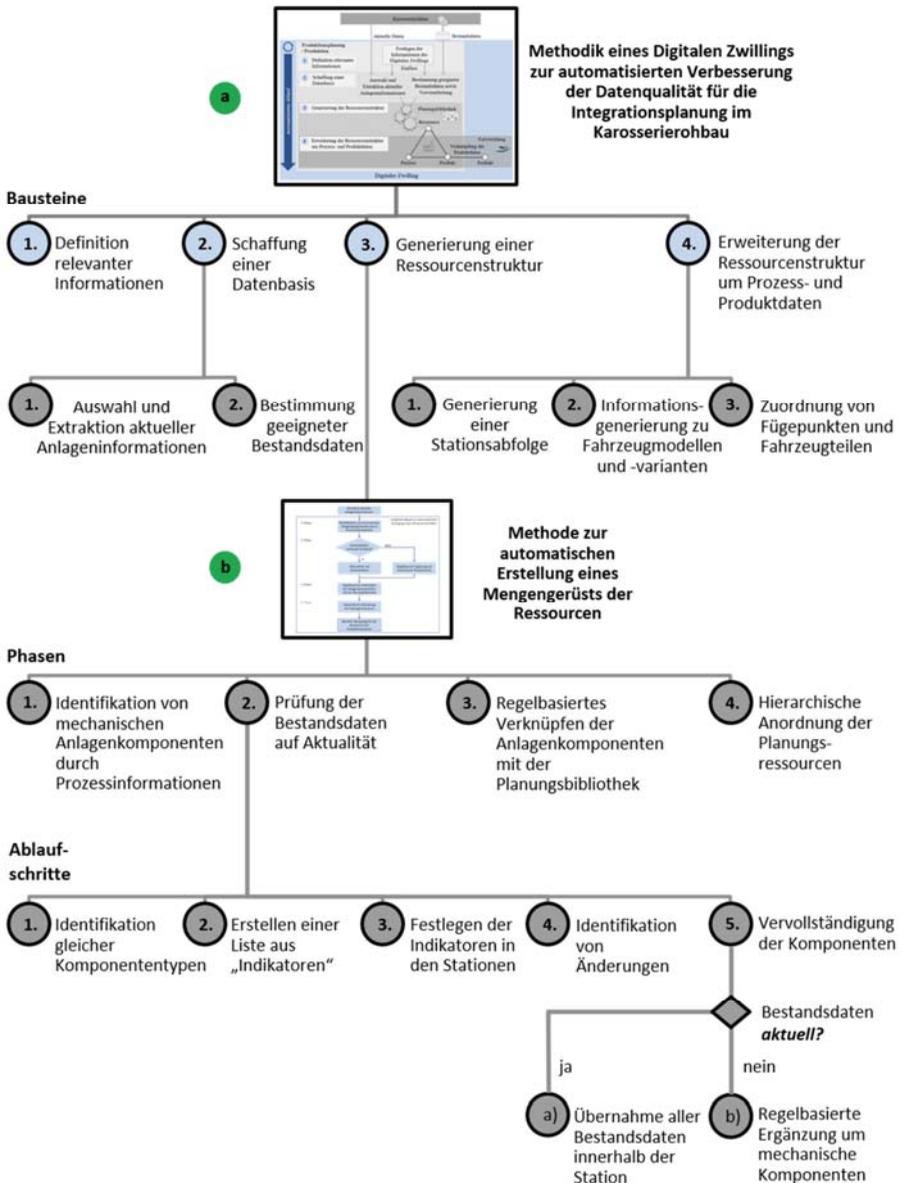


Abbildung 5-14: Struktur der Methodik

übernommen. Sind die Bestandsdaten nicht aktuell, nutzt der Ansatz eine regelbasierte Ergänzung der Komponenten um dazugehörige mechanische Komponenten. Die dritte Phase „regelbasiertes Verknüpfen der Anlagenkomponenten mit der Planungsbibliothek“ macht aus den einzelnen Anlagenkomponenten Ressourcen einer Produktionsplanung. In der letzten Phase der Methodik werden die einzelnen Ressourcen in eine hierarchisch angeordnete Planungsstruktur gebracht, woraus sich letztendlich das Mengengerüst der Ressourcen einer Planung ergibt. Der vierte Baustein „Erweiterung der Ressourcenstruktur um Prozess- und Produktdaten“ unterteilt sich in die automatisierte „Generierung einer Stationsabfolge“ (Abschnitt 5.4.1), die „Informationsgenerierung zu Fahrzeugmodellen und -varianten“ (Abschnitt 5.4.2) sowie in die „Zuordnung von Fügepunkten und Fahrzeugteilen“. In Summe ermöglicht die entwickelte Methodik alle relevanten Informationen aus der Zielsetzung (Kapitel 1.3) bereitzustellen und erlaubt es, die Anforderungen an die Methodik (Kapitel 2.4.) zu erfüllen.

Um die Funktionen der vorgestellten Methodik zu demonstrieren, wird im Kapitel 6 deren Umsetzung an einem Softwaredemonstrator vorgestellt.

6 Umsetzung der Methodik anhand eines Demonstrators

Die Funktionsweise der aufgezeigten Methodik wird zur Demonstration durch eine Softwareanwendung nachgewiesen. Das Kapitel geht auf die Softwarearchitektur des realisierten Demonstrators, dessen Informationsquellen auf die Visualisierung der relevanten Informationen sowie auf den Datenexport und Import in ein exemplarisches Planungssystem ein.

6.1 Softwarearchitektur des realisierten Demonstrators

Die Softwarearchitektur des realisierten Demonstrators ist in ein sogenanntes „Frontend“ und „Backend“ unterteilt. Die Softwareanwendung läuft auf einer virtuellen Maschine in einer Cloud. Abbildung 6-1 zeigt die Softwarearchitektur des in der Programmiersprache Java realisierten Demonstrators. Auf Abbildung 6-1 ist zu sehen, dass das Backend das weitverbreitete „spring“-

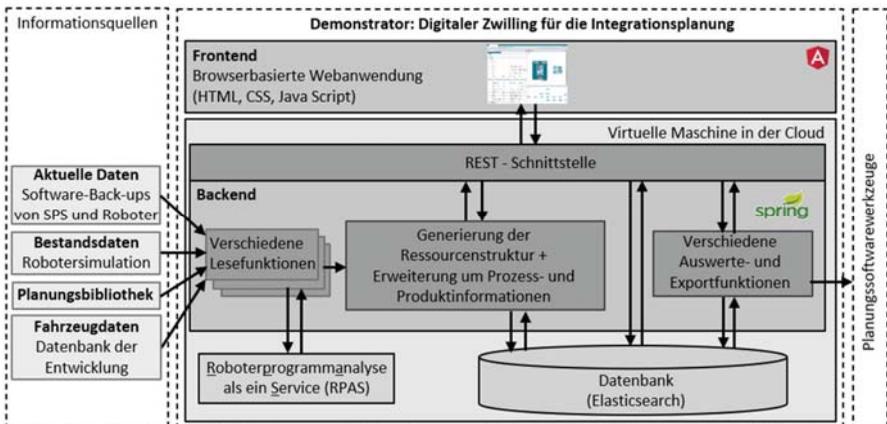


Abbildung 6-1: Strukturüberblick des realisierten Demonstrators

Framework als Java-Plattform für die Web-Anwendung nutzt. Im Backend der Software sind Lesefunktionen zum Einlesen unterschiedlicher Datenformate realisiert. Zusätzlich wurde eine Software zur Roboterprogrammanalyse als ein Service (RPAS) entwickelt, die die notwendigen Informationen aus einer Robotersoftware ausliest. Darauf aufbauend erfolgt die Implementierung der vorgestellten Methodik des Digitalen Zwillings zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung. Zur Speicherung und Ausgabe der Daten sind die Datenbank

(Elasticsearch) sowie eine Representational State Transfer (REST)-Schnittstelle implementiert. Das Frontend kommuniziert über die REST-Schnittstelle mit dem Backend und visualisiert die relevanten Informationen für den Planer. Das Frontend ist als browserbasierte Webanwendung umgesetzt, die sich auf das „Angular“ Framework stützt. Dies erlaubt eine universelle Nutzung mit nahezu allen webfähigen Endgeräten. Verschiedene Exportfunktionen ermöglichen den Datentransfer in diverse Planungssysteme wie beispielsweise DELMIA von Dassault Systèmes oder den Line Designer von Siemens (Biesinger et al. 2018b).

6.2 Informationsquellen

Die zur Verfügung stehenden **Datenquellen** sind gemäß den **Anforderungen** an den *Inhalt* (Relevanz, Aktualität und Vollständigkeit), der *Eignung zur Automatisierung sowie der Anwendung für große Produktionsanlagen* entsprechend der vorgestellten Methodik implementiert. Zur Umsetzung der im Kapitel 5 vorgestellten Methodik des Digitalen Zwillinges zur Verbesserung der Datenqualität für Integrationsplanungen im Karosserierohbau sind vier Informationsquellen ausgewählt. Es handelt sich um Fahrzeugdaten, eine Planungsbibliothek, Bestandsdaten aus der Robotersimulation und um aktuelle Back-up-Daten von Roboter und SPS-Programmkonfigurationen. Bei der Umsetzung der Methodik im Karosserierohbau eines Automobilherstellers stehen diese Informationsquellen in unterschiedlichen Datenformaten zur Verfügung. Abbildung 6-2 veranschaulicht die Informationsquellen im jeweils zur Verfügung stehenden Datenformat sowie die entsprechend umgesetzten Lesefunktionen des Demonstrators. Die Fahrzeugdaten lassen sich aus der Fahrzeugdatenbank als xls-Dateien exportieren. Der Softwaredemonstrator des Digitalen Zwillinges liest für jedes Fahrzeugmodell und deren Varianten eine xls-Datei ein. Die Planungsbibliothek steht als eine xlsx-Datei zur Verfügung, die aus dem genutzten Planungssystem exportiert ist. Für die Bestandsdaten werden exemplarisch aus der Robotersimulation exportierte Daten im AutomationML-Format verwendet. Häufig ist eine Produktionsanlage in mehrere Robotersimulationsmodelle gegliedert. Deshalb liest der Softwaredemonstrator für jede Produktionsanlage mehrere Robotersimulationsmodelle nacheinander ein. Eine AML-Datei ist wie eine xls-Datei jeweils individuell aufgebaut, weshalb die Lesefunktionen entsprechend individuell gestaltet sein muss. Hierbei ist es von Vorteil, wenn sich der Aufbau der Daten an einen Standard hält. Ein standardisierter Aufbau erleichtert das Einlesen einer Datei. Im vorgegebenen Standard verwenden die SPS-Konfigurationen die Dateiformate: .AWL, .CFG, .GR7 und .SDF. Zur Informationsgewinnung aus den entsprechenden SPS-Konfigurationen wurde ein SPS-Code Parser entwickelt. Die zur Verfügung stehenden Roboterkonfigurationen enthalten eine verschlüsselte asz-

ist exemplarisch rechts oben im Bild eine Auswahl von Detailinformationen zu den vom ausgewählten Roboter bearbeitenden Fahrzeugmodellen zu treffen. Hier ist ebenfalls der aus mehreren Fahrzeugteilen zusammengefügte Zusammenbau mit entsprechenden Fügepunkten, die die Fahrzeugteile verbinden, illustriert. Durch einen Klick auf das „+“ hinter der Fügepunktnummer werden weitere Detailinformationen wie die Zangenkraft, die Blechdicke oder die Schweißzeit ersichtlich. Rechts unten im Bild ist die automatisch generierte Stationsabfolge einer entsprechenden Produktionsanlage zu sehen. Diese veranschaulichen einem Planer, wie die einzelnen Stationen innerhalb der Produktionsanlage zusammenhängen. Somit sind alle für den Anwender relevanten Informationen des Digitalen Zwillings repräsentiert. Der Planer benötigt das Mengengerüst der Ressourcen jedoch zusätzlich im Planungssystem. Der Datentransfer ins Planungssystem wurde mithilfe des Datenformates AML realisiert.

6.4 Datentransfer in das Produktionsplanungssystem

Zum Datentransfer in das Produktionsplanungssystem wird vom Backend des Demonstrators eine entsprechende AML-Exportfunktion gestartet. AutomationML hat sich in den letzten Jahren immer mehr als neutrales Standardformat zum Datenaustausch innerhalb der Automobilindustrie etabliert. Das Mengengerüst der Ressourcen wird hierbei gemäß einer standardisierten Vorgabe exportiert (siehe Abbildung 6-4). Der Standard enthält Vorgaben hinsichtlich der Strukturierung der zu exportierenden Daten. Abbildung 6-4 zeigt das Mengengerüst der Ressourcen sowie die Stationsabfolge im Datenformat AML. Die AML-Datei wird auf der Abbildung im AML-Editor visualisiert. Das Mengengerüst der Ressourcen ist in der „InstanceHierarchy“ implementiert. Rechts zu sehen sind die einzelnen Attribute der entsprechenden Ressource. Das Mengengerüst der Ressourcen in der AML-Datei illustriert, dass die Struktur der Produktionsanlage nicht so tief ist als in der Visualisierung des Demonstrators. Dies liegt an der standardisierten Vorgabe zur Strukturierung der AML-Datei in „Enterprise“, „Site“, „Area“, „Productionline“, die sich an die IEC ISO 62264-1 anlehnt (IEC ISO 62264-1). Tiefere Anlagenstrukturen, wie sie ein Planer benötigt, werden in der AML-Datei über sogenannte Spiegelemente englisch „mirror objects“ realisiert, siehe beispielsweise die Ressourcen in Station 030 in der Abbildung. Die Abbildung der für die Planung relevanten Anlagenstrukturen durch Spiegelemente ermöglicht es, dass dieselbe AML-Datei auch von anderen Softwarewerkzeugen im Engineering verwendet und mit zusätzlichen für andere Interessensgruppen relevante Informationen erweiterbar ist. Die Spiegel-Objekte erlauben eine Erweiterung, um entsprechende Sichten auf das Produktionssystem ohne den wesentlichen Inhalt einzelner Ressourcen zu verändern. Wenn die Anlagenstruktur gemäß standardisierter Vorgabe, nach

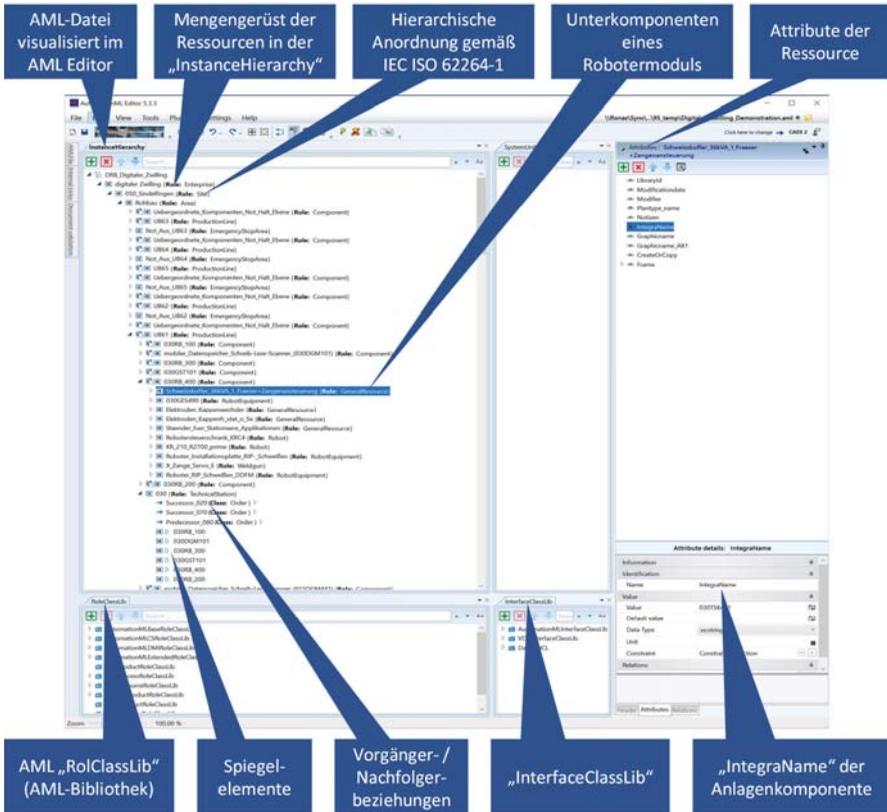


Abbildung 6-4: Demonstration AML-Export

der ebenfalls die Daten-Importfunktion ins Planungssystem programmiert wurde, aufgebaut ist, ist ein Import der Informationen ins Planungssystem möglich. Das vom Demonstrator erzeugte Mengengerüst der Ressourcen mit zugehöriger Stationsabfolge wurde als AML-Datei exemplarisch in das Planungssystem DELMIA Process Engineer (DPE) der Firma Dassault Systèmes importiert. Der DPE verwendet zur Verwaltung der Daten im Planungssystem eine Datenbank, die PPR-Hub genannt wird (Silcher 2014). Das im DPE PPR-Hub angelegte Mengengerüst ist in Abbildung 6-5 zu sehen. Hierbei ist die Planungsstruktur hierarchisch so dargestellt, wie sie ein Planer aus Planungsprojekten kennt. Im Planungssystem sind die Ressourcen sehr detailliert bis hin zu den einzelnen Spannern und Aufnahmestiften eines Handling-Roboters da abgebildet. Durch den entwickelten Demonstrator und den Import der erzeugten Daten ins Planungssystem wurde die

7 Evaluierung der Methodik

Die Evaluierung der „Methodik eines Digitalen Zwillings zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau“ erfolgt anhand einer Fallstudie. Der Aufbau der Fallstudie ist in Abbildung 7-1 dargestellt. Die Fallstudie ist methodisch in Anlehnung an

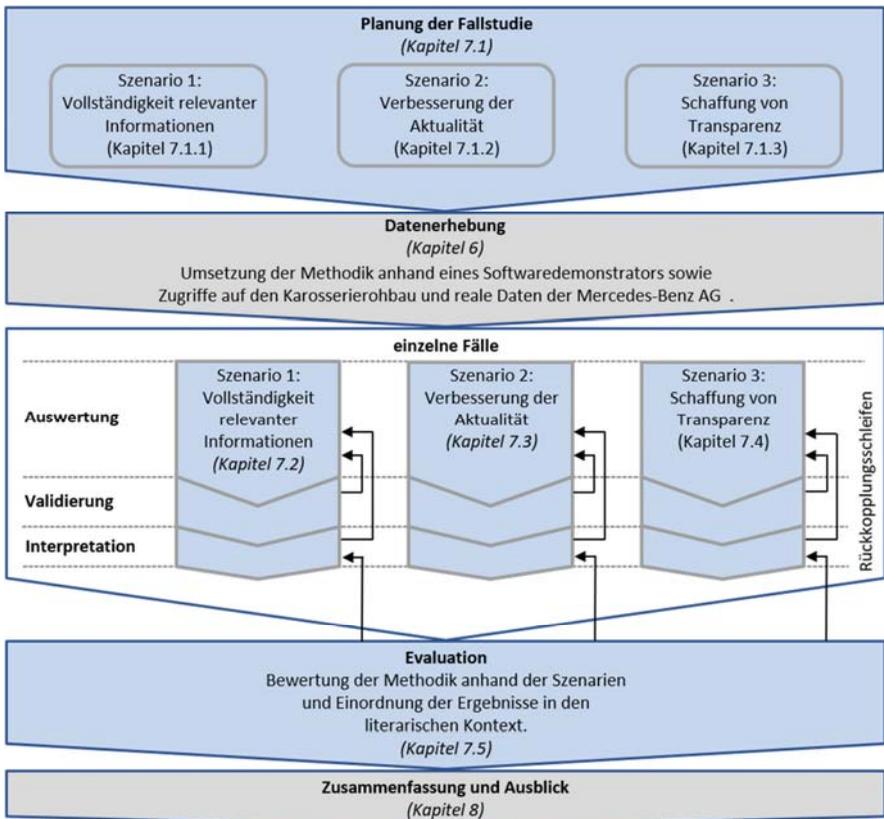


Abbildung 7-1: Erstellungsprozess einer Fallstudie in Anlehnung an (Albers 2007)

den „Erstellungsprozess einer Fallstudie“ nach ALBERS (Albers 2007) aufgebaut. Zu Beginn erfolgt die „Planung der Fallstudie“ gemäß den aufeinander aufbauenden Phasen (Kapitel 7.1). In diesem

Abschnitt sind die geplanten Szenarien sowie deren Hintergründe im Hinblick auf die Evaluierung der entwickelten Methodik dargelegt. Die Fallstudie umfasst die drei Szenarien „Vollständigkeit relevanter Informationen“, „Verbesserung der Aktualität“ und „Schaffung von Transparenz“. Die *Datenerhebung* erfolgt durch die in Kapitel 6 dargestellte Realisierung der Methodik anhand eines Softwaredemonstrators sowie durch dessen Anwendung an den im Folgenden erläuterten drei Szenarien. Auf dieser Datenbasis findet in den Kapiteln 7.2 bis 7.4 eine *Auswertung, Validierung und Interpretation der einzelnen Fälle* gemäß den definierten Anforderungen an die Methodik statt. Aufbauend auf die Auswertungen ist eine *kommunikative Validierung* mit Planungsexperten und Instandhaltern der Mercedes-Benz AG an der Produktionsanlage vor Ort sowie die Interpretation der Ergebnisse der betrachteten Fälle umgesetzt worden. Die Evaluation ist in Unterkapitel 7.5 ausgeführt. Die Bewertung der Methodik findet auf Basis der unterschiedlichen Szenarien statt. Ebenso werden die Ergebnisse in den literarischen Kontext eingeordnet.

In der Forschungsmethode „Design Science Research“ (Hevner et al. 2004), die in dieser Arbeit angewendet wird, existieren zahlreiche verschiedene Evaluierungsmethoden. Hinsichtlich der Bewertung besteht im Rahmen dieser Dissertation die Möglichkeit, die konzipierte Methodik für den Karosserierohbau eines Automobilunternehmens sowie den dazugehörigen Daten anzuwenden und zu validieren. Deshalb eignet sich aus dem Methodenspektrum von „Design Science Research“ besonders die beobachtende Evaluierung in Form einer Fallstudie. Auch IVANOV ET AL. (Ivanov et al. 2020) attestieren die wachsende Bedeutung von Fallstudien in der Industrie 4.0-Forschung, zu deren Schlüsselkomponente die Methodenforschung im Bereich des Digitalen Zwillings gehören. Deshalb wird die entwickelte Methodik anhand der in Abbildung 7-1 aufgezeigten Fallstudie evaluiert.

7.1 Planung der Szenarien

Als exemplarisches Produktionssystem für den Karosserierohbau wird die „Z1-Linie“ einer Modellreihe im Mercedes-Benz Werk in Sindelfingen ausgewählt. Eine „Z1-Linie“ (vgl. Abb. 1-1) eignet sich aufgrund der unsensiblen Daten des Fahrzeugunterbaus besonders gut für die Demonstration der entwickelten Methodik. Der für die Fallstudie ausgewählte Produktionsbereich „Z1-Linie“ umfasst fünf Produktionsanlagen, die wiederum mehrere SPS-Bereiche mit insgesamt mehr als 160 Robotermodulen, mehreren Fertigungstechnologien und über 1500 Anlagenkomponenten beinhalten. Um die entwickelte Methodik zu validieren und die Forschungsfragen beantworten zu können, lässt sich die Fallstudie in drei Szenarien mit unterschiedlichen Datenständen auffächern. Die Szenarien sind so konzipiert, dass sie zur Beantwortung der in Kapitel 2 dargelegten

Forschungsfragen dienen sollen. Dabei werden die Datenstände der „Z1-Linie“ von der Planung bis zur Produktionsphase im Zeitraum von fast 6 Jahren untersucht (Abbildung 7-2).

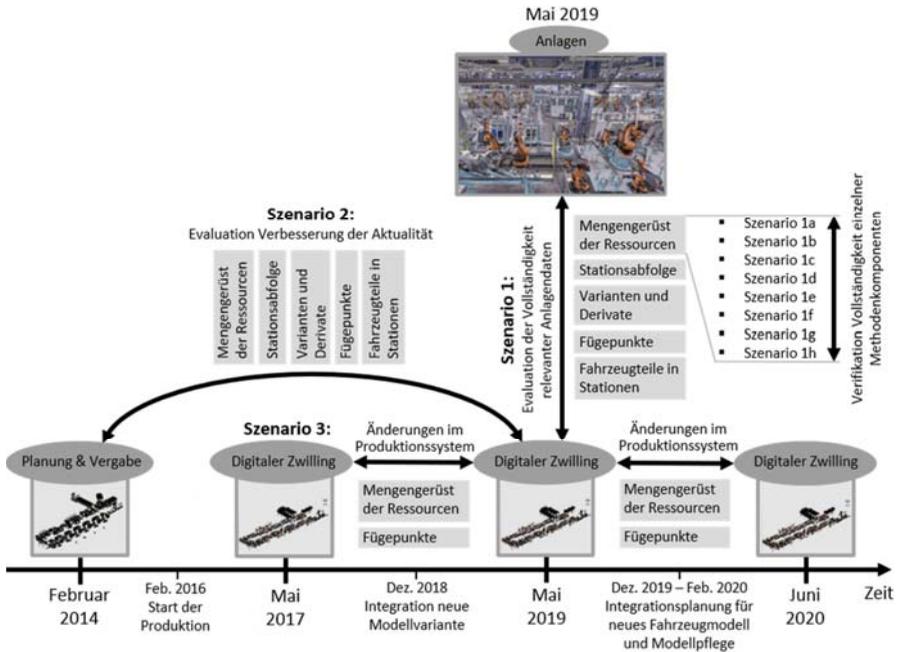


Abbildung 7-2: Planung der Szenarien

Szenario 1 dient dazu, die entwickelte Methodik zur automatisierten Erzeugung von einem Mengengerüst der Ressourcen, der Stationsabfolge, der Modell- und Variantenzuordnung, der Fügepunkte- sowie der Fahrzeugteilezuordnung zu einzelnen Stationen auf ihre *Vollständigkeit* und *Relevanz* zu prüfen. Das Szenario soll den Nachweis erbringen, dass die entwickelte Methodik in einem realen Anwendungsszenario greift. In Szenario 2 erfolgt der Test, ob sich der automatisierte Ansatz an einem wirklichkeitsgetreuen Anwendungsfall zur Verbesserung der Datenqualität für eine Integrationsplanung eignet. Dabei wird die Verbesserung der Datenqualität gegenüber dem „aktuellen“ Planungsprojekt am Beispiel der Datenqualitätsmetrik „Aktualität“ ermittelt. Während des Anlagenlebenszyklus kommt es in einem Karosserierohbau zu Änderungen am Produktionssystem. In Szenario 3 wird mithilfe der entwickelten Methodik untersucht, ob sich das komplexe System Karosserierohbau während des Anlagenlebenszyklus für eine Integrationsplanung transparent darstellen lässt.

7.1.1 Planung Szenario 1

Szenario 1 ist ein wirklichkeitsgetreuer Anwendungsfall, in dem die entwickelte Methodik zur Verbesserung der Datenqualität eines Digitalen Zwillings für die Integrationsplanung im Karosserierohbau bereits innerhalb einer realen Integrationsplanung Anwendung fand. Hierbei nutzte die Produktionsplanung des Automobilherstellers den Digitalen Zwilling für die Integrationsplanung eines neuen Fahrzeugmodells in die bestehende Z1-Linie. Die entwickelte Methodik verwendet zur Erstellung des Digitalen Zwillings in Szenario 1, aktuelle Gerätekonfigurationen der Produktionsanlage zum Zeitpunkt Mai 2019. Anhand dieses Szenarios wurden zusätzlich die einzelnen Methodenbausteine der „Methode zur automatischen Erstellung einer Ressourcenstruktur“ und deren Beitrag zur „Verbesserung der Datenqualität“ im Hinblick auf die *Vollständigkeit* ausgewertet und evaluiert. In Abbildung 7-3 sind die Methodenbausteine „Identifikation von mechanischen Anlagenkomponenten“, „Übernahme von aktuellen Bestandsdaten“ und „regelbasierte

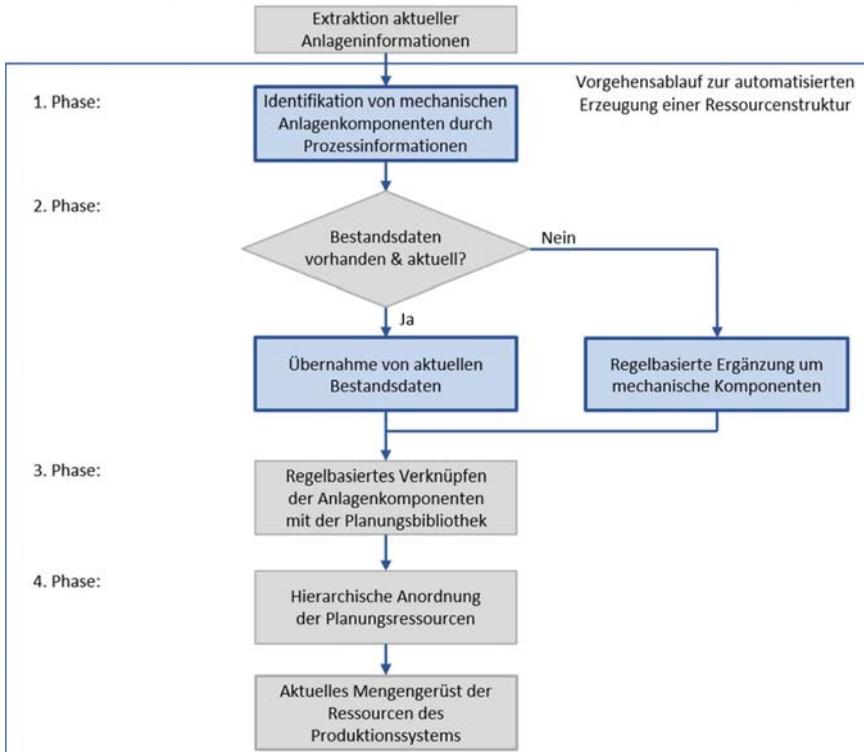


Abbildung 7-3: Einfluss unterschiedlicher Methodenteile auf die Vollständigkeit

Ergänzung um mechanische Komponenten“, deren Auswirkung auf die *Vollständigkeit* in diesem Szenario genauer untersucht wird, blau dargestellt. In Tabelle 7-1 ist die Untersuchung des Einflusses der Methodenteile in acht Unterszenarien von 1a bis 1h aufgeteilt.

Tabelle 7-1: Szenarien zur Validierung von einzelnen Methodenteilen

Methodenteile	Übernahme von aktuellen Bestandsdaten	Regelbasierte Ergänzung um relevante Komponenten	Identifikation von mechanischen Komponenten durch Prozessinformationen
Szenario 1a	1	1	1
Szenario 1b	0	1	1
Szenario 1c	1	0	1
Szenario 1d	1	1	0
Szenario 1e	1	0	0
Szenario 1f	0	1	0
Szenario 1g	0	0	1
Szenario 1h	0	0	0

In **Szenario 1a** wird die „Verbesserung der Datenqualität“ eines Mengengerüstes der Ressourcen für die Integrationsplanung im Karosserierohbau durch die entwickelte Methodik hinsichtlich *Vollständigkeit* bewertet. In den weiteren Unterszenarien b bis h erfolgt die Untersuchung, inwieweit sich einzelne Methodenbausteine auf die automatisierte „Verbesserung der Datenqualität“ des Digitalen Zwillings hinsichtlich der *Vollständigkeit* des Mengengerüstes der Ressourcen auswirken. Szenario **1b** bildet den Fall ab, dass keine Bestandsdaten in Form von Robotersimulationen zur Verfügung stehen. Dies ist ein bedeutender Anwendungsfall, da durch diesen Ansatz zukünftig gegebenenfalls hohe Kosten für manuelle Dokumentationen eingespart werden können. Denn standardisierte Vorgaben von OEMs bezüglich der Software und zur Durchführung des Engineerings verursachen beim Anlagenlieferant große Kostenaufwendungen (Schneider 2011, S. 96). Dies sind beispielsweise Kosten aufgrund des Einhaltens von Richtlinien und Anforderungen beim Aufbau der Produktionsanlage während der Implementierung und Durchführungsphase. Weitere Kostenverursacher sind ebenfalls spezielle Softwareschulungen für das Personal sowie Lizenzkosten für die vom jeweiligen Automobil-OEM vorgeschriebenen Softwarewerkzeuge. Diese Kosten kalkuliert ein Anlagenlieferant wiederum in sein Angebot zum Aufbau oder Umbau einer Produktionsanlage mit ein. Eine Reduzierung von Vorgaben an den Anlagenlieferanten durch den OEM ist daher ein Stellhebel zur Kostenreduktion für den Aufbau beziehungsweise Umbau einer Produktionsanlage (Schneider 2011, S. 96). Ohne standardisierte Vorgaben werden Bestandsdaten wiederum in unterschiedlichsten Formaten und Formen vom Zulieferer übergeben. Infolgedessen wird eine automatisierte Verwendung der Bestandsdaten wie beispielsweise bei einer

Robotersimulation kaum bewerkstelligt. In diesem Fall erfolgt deshalb die Untersuchung der Auswirkungen der Verwendung von Bestandsdaten durch die Methodik auf das Ergebnis. Szenario **1c** zeigt die Bedeutung des Methodenbausteins „regelbasierte Ergänzung um relevante Komponenten“ durch dessen Fehlen im Szenario für das Mengengerüst der Ressourcen auf. Somit fehlen in diesem Anwendungsfall die regelbasierte Ergänzung und die implementierte Logik, um zusammengehörende, rein mechanische Anlagenkomponenten automatisch zu erzeugen. Szenario **1d** legt den Beitrag des Methodenbausteins „Identifikation von mechanischen Komponenten durch Prozessinformationen“ auf die Verbesserung der Datenqualität offen. In diesem Fall werden keine Informationen über rein mechanische Anlagenkomponenten aus der Robotersoftware extrahiert. Szenario **1e**, **1f** und **1g** charakterisiert die Verbesserung der Datenqualität für die einzelnen Methodenbausteine separat. In Szenario **1h** erfolgt eine automatisierte Erzeugung des Digitalen Zwillings ausschließlich auf Basis der elektrischen und mechatronischen Anlagenkomponenten in der Produktionsanlage ohne zusätzliche Methodenbausteine. Prozess- und Produktdaten sind immer direkt aus den Informationen der aktuellen Produktionsanlage abgeleitet. Deshalb gibt es hier keine Unterscheidung zwischen einzelnen Methodenbausteinen anhand von Unterszenarien.

7.1.2 Planung Szenario 2

Szenario 2 erfolgt die Evaluierung der automatisierten Verbesserung der Datenqualität durch die entwickelte Methodik hinsichtlich der *Aktualität*. Hierfür ist das reale Szenario der Integrationsplanung vom Jahr 2019 eingebracht. In diesem Fall lag nur ein Planungsstand (ursprünglicher Vergabestand) vom Februar 2014 vor. Zur Integrationsplanung des neuen Fahrzeugmodells war jedoch ein aktueller Planungsstand der Produktionsanlage erforderlich. Durch den Digitalen Zwilling kann der Planungsstand mithilfe der entwickelten Methodik automatisiert erstellt werden. In diesem Szenario erfolgt daher die Validierung, inwieweit die automatisierte Verbesserung der Datenqualität nach der Datenqualitätsmetrik *Aktualität* durch die entwickelte Methodik möglich ist. Dafür ist die Validierung und Evaluierung der *Aktualität* des Planungsstandes vom Februar 2014 gegenüber dem automatisch generierten digitalen Abbild durch den Digitalen Zwilling notwendig.

7.1.3 Planung Szenario 3

In **Szenario 3** wird die entwickelte Methodik angewendet, um die „Änderungen“ während des Anlagenlebenszyklus der Produktionsanlage zu identifizieren. Damit lässt sich das komplexe System „Karosserierohbau“ für eine Integrationsplanung transparent charakterisieren (siehe Abbildung 7-4). Mithilfe der entwickelten Methodik ist es möglich, „Änderungen“ während des Anlagenlebenszyklus im Zeitraum von 3 Jahren am Beispiel Mengengerüst der Ressourcen (exemplarisch für Stammdaten) und am Beispiel von Schwerpunkten (volatile Daten) zu untersuchen. Das Szenario kann damit Antworten auf die Frage geben: Was ändert sich wie stark während der Produktionsphase in Produktionsanlagen in einem Karosserierohbau. Gleichzeitig gilt es, die Anwendbarkeit des Digitalen Zwillings für ein komplexes Produktionssystem (fünf Produktionsanlagen) und den verbesserten Umgang mit Komplexität in einem Karosserierohbau durch die entwickelte Methodik aufzuzeigen.

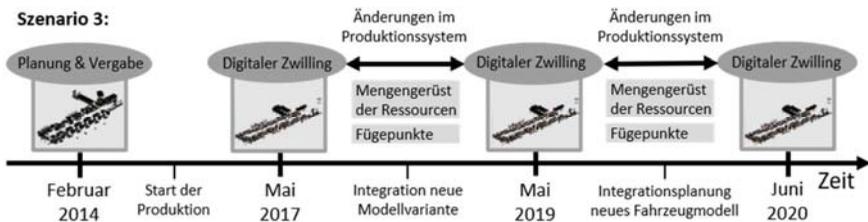


Abbildung 7-4: Änderungen im Anlagenlebenszyklus

7.2 Szenario 1 – Vollständigkeit relevanter Informationen des Digitalen Zwillings

Um die Verbesserung der Datenqualität hinsichtlich der *Vollständigkeit* zu bewerten, erfolgt im Weiteren die Validierung der *Vollständigkeit* relevanter Informationen des Digitalen Zwillings. Im Unterkapitel 7.2.1 wird die *Vollständigkeit* relevanter Anlagenkomponenten sowie der Planungsstruktur überprüft, die zusammen das Mengengerüst der Ressourcen ergeben. Unterkapitel 7.2.2 zeigt die Validierung der automatischen Generierung einer Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen der Fertigungsstationen im Karosserierohbau. Die Überprüfung der Anforderungen an die Informationen über Fahrzeugmodelle und -varianten, die in einer jeweiligen Fertigungsstation bearbeitet werden, ist im Unterkapitel 7.2.3 enthalten. In Unterkapitel 7.2.4 sind die Vollständigkeit für Fügestellen und Fahrzeugvarianten validiert. Basierend auf die Validierung der unterschiedlichen relevanten Informationen für die Integrationsplanung erfolgt die Evaluation in Unterkapitel 7.2.5.

7.2.1 Mengengerüst der Ressourcen

Ein Mengengerüst der Ressourcen setzt sich in einem Planungsprojekt aus der Planungsstruktur, den darin enthaltenen Anlagenkomponenten sowie weiteren Unterkomponenten zusammen. Die objektive Überprüfung der automatisch erzeugten Anlagenstruktur gegenüber dem realen Z1-Bereich hat gezeigt, dass die Struktur in allen fünf untersuchten Produktionsanlagen vollständig mit der des Produktionssystems übereinstimmt. Die Anlagenstruktur enthält alle für das Planungsprojekt relevanten Fertigungsstationen, Pufferstationen sowie Fördertechnik. Abbildung 7-5 zeigt exemplarisch die validierte Anlagenstruktur der Produktionsanlage 1.

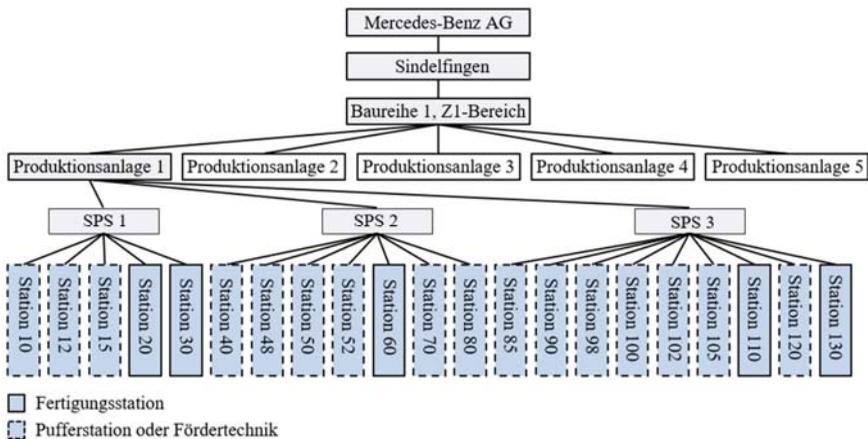


Abbildung 7-5: Auswertung automatisch erzeugte Anlagenstruktur - Produktionsanlage 1

Validierung der Anlagenkomponenten hinsichtlich Vollständigkeit

Nicht alle Anlagenkomponenten, die über die entwickelte Methodik abbildbar sind, sind auch für ein Planungsprojekt einer Produktionsplanung relevant. Auswertungen an den fünf Produktionsanlagen haben ergeben, dass ungefähr 84,1 Prozent der identifizierten Komponenten für eine Planung von Bedeutung sind. Die Methodik ermöglicht ein Herausfiltern dieser Anlagenkomponenten. Irrelevant für eine Grobplanung sind zum Beispiel Netzwerkrouter und Switches, die der Algorithmus vernachlässigt. Die Relevanz von Anlagenkomponenten für ein Planungsprojekt ist im Folgenden durch die Anlagenkomponenten bestimmt, die in der standardisierten Planungsbibliothek im untersuchten Unternehmen zum Zeitpunkt Mai 2018 enthaltenen sind. Dies bedeutet, dass eine Anlagenkomponente der vorhandenen Produktionsanlagen ein passendes Gegenüber in der Planungsbibliothek haben muss, damit sie für die Integrationsplanung von Nutzen ist. Im Rahmen der Verifizierung der Methodik ist es möglich, für die aus fünf Produktionsanlagen bestehende Z1-

Linie, insgesamt 1588 bedeutende Komponenten zu identifizieren. Die Validierung von 22 Anlagenkomponenten der sich über der Anlage befindenden Fördertechnik war aufgrund des verbotenen Zutritts unrealisierbar. Die Identifikation von weiteren 12 Anlagenkomponenten ist aufgrund der begrenzten Zugänglichkeit durch Schutzzäune und Sichtschutz nicht möglich. Zusätzlich wurden in der Produktionsanlage gegenüber den durch die Methodik erzeugten Anlagenkomponenten drei weitere Anlagenkomponenten (Lichtschranken) identifiziert. Gleichzeitig erfolgte die automatisierte Erzeugung von je einer Lichtschranke in den entsprechenden Fertigungsstationen, deren Identifikation offenblieb. Hierbei liegt die Vermutung nahe, dass es einen Fehler bei der Bezeichnung während des Aufbaus gegeben hat. Die Ursache für die fehlende Übereinstimmung kann sowohl eine falsche Beschriftung beim Aufbau der Lichtschranke als auch eine fehlerhafte Bezeichnung bei der elektrischen Programmierung sein. Da dies jedoch nur eine Spekulation ist, erfolgte die Berechnung der Gesamtanzahl der Komponenten in Tabelle 7-2 aus den automatisch erzeugten Anlagenkomponenten und den zusätzlich in der Anlage identifizierten Anlagenkomponenten. Tabelle 7-2 zeigt die Validierungsergebnisse der *Vollständigkeit* von Anlagenkomponenten zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 7-2: Auswertung der relevanten Anlagenkomponenten für eine Planung

Beschreibung		Anzahl Anlagenkomponenten [Stück]	Prozentual [%]
Erzeugt	Identifiziert:	1588	97,7
	Nicht gefunden:	12	0,7
	Nicht kontrollierbar:	22	1,4
In Anlage identifiziert (nicht erzeugt)		3	0,2
Gesamt:		1625	100

Die Auswertung der automatisiert erzeugten Geräte an den exemplarischen Produktionsanlagen zeigt, dass alle Vorrichtungen, Roboter und alle Geräte der drei vorhandenen Fügetechnologien, die Messtechnik sowie das Handling richtig erzeugt werden.

Einfluss einzelner Methodenbausteine

Erkenntnisse über den Einfluss der einzelnen Methodenbausteine (vergleiche Abbildung 7-3) auf die *Vollständigkeit* relevanter Geräte liefert die Auswertung der Szenarien 1b bis 1h. Tabelle 7-3 enthält die Ergebnisse der Szenarien unter der Annahme, dass die aus dem Szenario 1a erzeugten und in der Anlage vor Ort identifizierten Anlagenkomponenten der maximalen *Vollständigkeit* der Anlagenkomponenten entspricht (auf 100 Prozent „Vollständigkeit“ normiert). Diese normierten 100

Prozent aus dem Szenario 1a dienen somit als Maßstab, um die einzelnen Methodenbausteine hinsichtlich automatisierter Erzeugung der relevanten Anlagenkomponenten auf ihre *Vollständigkeit* hin zu bewerten. Die Tabelle 7-3 zeigt, dass die Szenarien 1a bis 1f jeweils über 95 Prozent der relevanten Anlagenkomponenten erzeugen (blau dargestellt).

Tabelle 7-3: Auswertung der Szenarien 1a bis 1h

	Übernahme von aktuellen Bestandsdaten	Regelbasierte Ergänzung um relevante Komponenten	Identifikation mechanischer Komponenten durch Prozessinformationen	Erzeugte Komponenten im Produktionssystem identifiziert
Szenario 1a	1	1	1	100 %
Szenario 1b	0	1	1	95,7 %
Szenario 1c	1	0	1	95,6 %
Szenario 1d	1	1	0	99,8 %
Szenario 1e	1	0	0	98,2 %
Szenario 1f	0	1	0	95,1 %
Szenario 1g	0	0	1	63,0 %
Szenario 1h	0	0	0	61,8 %

Szenario 1g und 1h (grau dargestellt) sind dabei lediglich für knapp über 60 Prozent der relevanten Anlagenkomponenten verantwortlich. Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass über 95 Prozent der Anlagenkomponenten generiert werden, wenn entweder der Methodenbaustein mit der regelbasierten Ergänzung oder der Methodenbaustein zur Übernahme von aktuellen Bestandsdaten vorhanden ist. Die Identifikation rein mechanischer Anlagenkomponenten durch Prozessinformationen aus dem Roboter spielt mit einer Steigerung von 1,2 Prozent (Szenario 1h zu 1g) eine untergeordnete Rolle. Auf den ersten Blick erscheint ein Wert von knapp über 60 Prozent als nicht zweckmäßig. Nähere Betrachtungen der erzeugten Anlagenkomponenten zeigen aber, dass diese Anlageninformationen alle Fertigungsverfahren, die Messtechnik und Handhabungsgeräte enthalten und diese der richtigen Station zugeordnet sind. Hierbei fehlen jedoch die mechanischen Anlagenkomponenten, die zu einem jeweiligen Fertigungsverfahren gehören. Dies wird ersichtlich, wenn die Verbesserung um 33,3 Prozent von Szenario 1h zu 1f betrachtet werden. Hierbei wurden relevante Anlagenkomponenten, die rein mechanisch sind und zum jeweiligen Fertigungsverfahren, Messverfahren oder zum Handhabungsgerät zugeordnet sind, regelbasiert ergänzt. Zusätzlich konnte die Anzahl der Spanner und Stiftziehzylinder von Robotern mit Handhabungsgeräten sowie von Vorrichtungen, die automatisiert aus der Steuerungstechnik erzeugt werden, stichprobenhaft korrekt validiert werden.

Evaluierung Mengengerüst der Ressourcen nach *Vollständigkeit*

Die Validierung des Mengengerüsts der Ressourcen hat erwiesen, dass die Anlagenstruktur exakt mit der Struktur der untersuchten Produktionsanlagen übereinstimmt. Weiter haben die überprüften 97,7

Prozent der Anlagenkomponenten verdeutlicht, dass die in dieser Dissertation entwickelte Methodik das Mengengerüst der Ressourcen nahezu vollständig abbildet. Es war möglich, alle Fertigungsverfahren inklusive Messtechnik, Handhabungsgeräte sowie Vorrichtungen digital darzustellen. Lediglich drei Lichtschranken konnten vor Ort identifiziert werden, die nicht automatisiert erzeugt wurden. Die Überprüfung der Datenstände hat belegt, dass dies nicht an dem entwickelten methodischen Ansatz liegt, da dieser ebenfalls die automatische Erzeugung von weiteren Lichtschranken umfasst. Vielmehr ist der Fehler auf eine unterschiedliche Bezeichnung zwischen elektrischer Konfiguration in den jeweiligen Steuerungen und der Bezeichnung an der Anlage vor Ort zurückzuführen. Bei der Anwendung der Methodik wurden aber auch Schwachstellen bei der Umsetzung in der Praxis aufgedeckt. So wurden im ersten Durchlauf der Methodik große Teile der Bestandsdaten der Produktionsanlage als „veraltet“ klassifiziert. Der Großteil der Bestandsdaten war jedoch aktuell. Die Anwendung der Ishikawa-Methode hat veranschaulicht, dass viele unterschiedliche Anlagenkomponenten in der untersuchten Produktionsanlage den Funktionsgruppenkürzeln „ZFE“ (Zufuhreinheit), „ABS“ (Ablagestation) und „SGV“ Schutzgitter zugeordnet sind. Diesen Funktionsgruppenkürzeln sind sowohl rein mechanische als auch mechatronische Anlagenkomponenten zugeordnet. Gleichzeitig waren die Funktionsgruppenkürzel als mechatronische Anlagenkomponenten in den Bestandsdaten und in den aktuellen Informationen aus den Steuerungen enthalten und galten damit fälschlicherweise als „Indikatoren“ für die Aktualität der Information. Erst ein manuelles Herausnehmen dieser drei Funktionsgruppen brachte die korrekten Ergebnisse. Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass die Identifikation der *Aktualität* von Bestandsdaten nur korrekt funktioniert, wenn in der Praxis eine ausreichend detaillierte Einteilung der Anlagenkomponenten in unterschiedliche Funktionsgruppen insbesondere zwischen mechanischen und mechatronischen Komponenten gegeben ist. Ansonsten müssen bestimmte Funktionsgruppen gegebenenfalls als Indikatoren für die *Aktualität* ignoriert werden. Bei der Auswertung wurde ebenfalls deutlich, dass die genutzte Planungsbibliothek nicht alle Komponenten abbilden kann. Die Planungsbibliothek vom Mai 2019 war sehr grob, um die realen Anlagenkomponenten vor Ort digital abzubilden. Theoretisch wäre eine deutlich genauere digitale Abbildung der Produktionsanlagen als Mengengerüst der Ressourcen möglich. Beispielsweise existieren in der realen Produktionsanlage Roboterpodeste mit vielen unterschiedlichen Höhen, die in der Planungsbibliothek zum Zeitpunkt der Auswertung nicht vorhanden sind. So gelang es durch die entwickelte Methodik zwar, die genauen Höhen aller Roboterpodeste zu ermitteln, es gab aber in der Planungsbibliothek hierfür zunächst nur vier Höhen zur entsprechenden Einordnung der

Roboterpodeste. Deshalb sind die realen Höhen der Roboterpodeste des Produktionssystems zunächst nicht exakt durch die Bibliothek darstellbar. Die Lösung dieses Problems gelang durch eine prototypische Erweiterung der Planungsbibliothek um weitere Höhen der Roboterpodeste. DINSE (Dinse 2015, S. 132) bestätigt durch seine Untersuchungen bei BMW im Jahr 2015, dass die Planungsbibliothek in der Praxis bei Automobil-OEMs häufig zu grob ist. Aus den Erfahrungen dieser Abhandlung wurde deshalb eine Empfehlung zur Erweiterung der Planungsbibliothek sowie eine Überarbeitung des Bibliothekskonzeptes abgeleitet. Das neue Bibliothekskonzept soll zukünftig eine detailgetreuere Abbildung der realen Produktionsanlage als Mengengerüst der Ressourcen in einem Planungsprojekt ermöglichen. Die Untersuchung der einzelnen Methodenbausteine (vergleiche Abbildung 7-3) hat zusätzlich gezeigt, dass sich das Mengengerüst am genauesten abbilden lässt, wenn zur Anlage passende Bestandsdaten vorhanden sind. Doch auch ohne das Vorhandensein von aktuellen Bestandsdaten kann die entwickelte Methodik ein sehr gutes digitales Abbild der realen Produktionsanlage erzeugen.

7.2.2 Stationsabfolge

Die Validierung der Stationsabfolge konnte erfolgreich vor Ort im Karosserierohbau stattfinden. Die Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen der Fertigungs- und Ablagestationen stimmen vollständig mit der realen Z-Linie überein. Die sich über den Produktionsanlagen befindenden Fördertechnik (Kettenmagazine), die Fahrzeugteile beispielsweise in die Produktionsanlage 1 zuführt, ist nicht enthalten. Abbildung 7-6 stellt am Beispiel der Produktionsanlage 3 dar, wie einzelne Fertigungs- und Ablagestationen in einer Produktionsanlage im Karosserierohbau zusammenhängen.

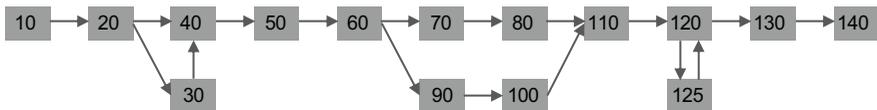


Abbildung 7-6: Auswertung der Stationsabfolge in Produktionsanlage 3

Die Auswertung der Ergebnisse hat nachgewiesen, dass sich die Stationsabfolge mit allen Stationen der Z1-Linie vollständig und fehlerfrei abbilden lässt. Lediglich die sich über den Produktionsanlagen befindende Fördertechnik ist nicht vollständig darstellbar.

7.2.3 Fahrzeugmodelle und -varianten

Ebenso ist es möglich, Fahrzeugmodelle und -varianten, die in einer Fertigungsstation bearbeitet werden, automatisiert zu generieren und der entsprechenden Station bzw. dem Roboter zuzuordnen. Abbildung 7-7 demonstriert einen Überblick der in der Z1-Linie produzierten Fahrzeugmodelle und

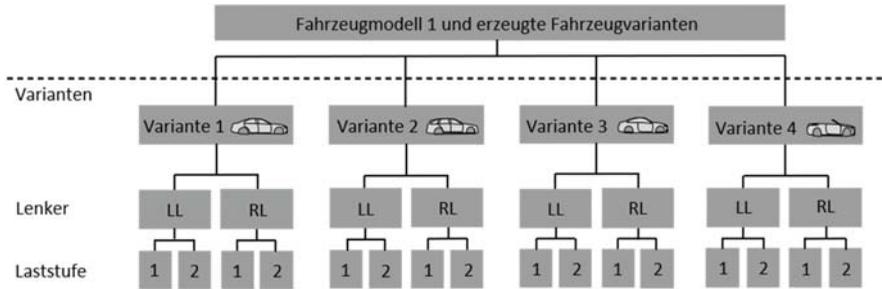


Abbildung 7-7: Validierung der Fahrzeugmodelle und -varianten

deren Varianten. Insgesamt sind 16 unterschiedliche Fahrzeugvarianten digital abgebildet. Die Auswertung weist nach, dass die Fahrzeugmodelle und -varianten des Digitalen Zwillinges mit denen in den untersuchten Produktionsanlagen übereinstimmen.

7.2.4 Fügepunkte und Fahrzeugteile

Die Überprüfung der Fügepunkte und der Fahrzeugteile ist am Beispiel des Fügeverfahrens 1 Widerstandspunktschweißen erfolgt. Hierfür wurden zwei Validierungen für die vom Roboter geschweißten Fügepunkte und Fahrzeugteile durchgeführt (siehe Abbildung 7-8). Für zwei verschiedene Fahrzeugversionen, die Variante 1 und Variante 4 je Linkslenker (LL) mit Laststufe 2, erfolgte die Überprüfung der Anzahl digitaler Schweißpunkte vor Ort. Die Auswertung der Schweißpunkte jedes einzelnen Schweißroboters der untersuchten Produktionsanlagen in der Z1-Linie hat bewiesen, dass die Anzahl der Schweißpunkte des Digitalen Zwillinges mit der geschweißten Anzahl im Karosserierohbau übereinstimmt. Zur Validierung der von einem Roboter geschweißten Fahrzeugteile eigneten sich digitale Konstruktionsdaten aus der Entwicklung des kompletten Fahrzeugunterbaus der Fahrzeugvariante 1, Linkslenker mit Laststufe 2. Hierbei stimmten die aus den Robotern ausgelesenen Fügepunkte mit denen aus allen Zusammenbaukombinationen von Fahrzeugteilen des kompletten Fahrzeugunterbaus überein. Es passen sowohl die Anzahl als auch die Bezeichnung der ausgelesenen Schwerpunkte mit allen Schweißpunkten des Fahrzeugunterbaus zusammen. Zusätzlich wurden, wenn vorhanden, die Fahrzeugteilenummern an der Anlage vor Ort mit der digital erstellten Fahrzeugzuordnung zum Roboter überprüft. Die Auswertungen hat beweisen, dass es möglich ist, durch den Digitalen Zwilling die richtige Anzahl und Bezeichnung der jeweiligen Fügepunkte aus den Robotern auszulesen und dem jeweiligen Roboter die richtigen zu verbindenden Fahrzeugteile zuzuordnen. Somit erlaubt der Digitale Zwilling die Bereitstellung der

zur automatisierten Erzeugung relevanter Informationen für die Integrationsplanung im Karosserierohbau eignet.

7.3 Szenario 2 – Verbesserung der Datenqualität in der Metrik „Aktualität“

In diesem Szenario wird die automatisierte Verbesserung der Datenqualität des Digitalen Zwillinges durch die entwickelte Methodik gegenüber dem aktuell verfügbaren Planungsprojekt zum Zeitpunkt der Integrationsplanung evaluiert. Dabei wird der Digitale Zwilling mit dem Datenstand vom Mai 2019 gegenüber dem neusten Planungsstand zur Z1-Linie „Vergabestand verhandelt“ (Februar 2014) validiert. Die Untersuchung des Planungsstandes zeigt, dass dieser lediglich Daten zum *Mengengerüst* der Ressourcen enthält. Informationen zur *Stationsabfolge* sowie zu den in einer Station bearbeitenden *Fahrzeugvarianten*, *Fügepunkten* und *Fahrzeugteilen* sind in dem Datenstand aus der Praxis nicht enthalten. Somit können diese Informationen in den Datenqualitätsmetriken **Vollständigkeit** und **Aktualität** von null auf hundert Prozent gesteigert werden. Um die Verbesserung der Datenqualität durch den Digitalen Zwilling für das Mengengerüst der Ressourcen nachzuweisen, wird die Aktualität des Mengengerüsts der Ressourcen des besten zur Verfügung stehenden Planungsstand der fünf untersuchten Produktionsanlage bewertet. Hierzu wird der Planungsstand im Folgenden gegenüber dem Mengengerüst der Ressourcen des Digitalen Zwillinges quantitativ und qualitativ hinsichtlich Aktualität ausgewertet. Die quantitative und qualitative Validierung dürfen folglich nicht als Gegensätze oder konkurrierende Verfahren angesehen werden, sondern stellen ergänzende Alternativen der empirischen Forschung dar (Lamnek 2005, S.274 ff.). Diese objektiven Maße sollen eher eine moderierende Wirkung aufweisen (Albers 2007, S. 110).

7.3.1 Quantitative Validierung der Aktualität des Planungsstandes

Bei der quantitativen Validierung erfolgt die Betrachtung der Anzahl der **geplanten** Anlagenkomponenten gegenüber den IST-Produktionsanlagen der Z1-Linie. Darauf aufbauend wird die *Aktualität* des Mengengerüsts der Ressourcen vom Planungsstand bewertet. Das Mengengerüst der Ressourcen unterteilt sich wiederum in die Anlagenstruktur und ihre Ressourcen. Die Planungsstruktur des Planungsprojektes weicht im Planungsstand deutlich von der realen Produktionsanlage ab. Abbildung 7-9 präsentiert die quantitative Auswertung zur Anzahl der Stationen zwischen Planungsprojekt und realer Produktionsanlage. Als grauer Balken ist im Folgenden die reale Anzahl der Stationen / Komponenten dargestellt. Der rote Balken stellt die Abweichung des „besten“ verfügbaren Planungsstandes zur untersuchten Z1-Linie gegenüber dem digitalen Abbild dar. In der Abbildung ist zu erkennen, dass bei der Anzahl an Stationen innerhalb

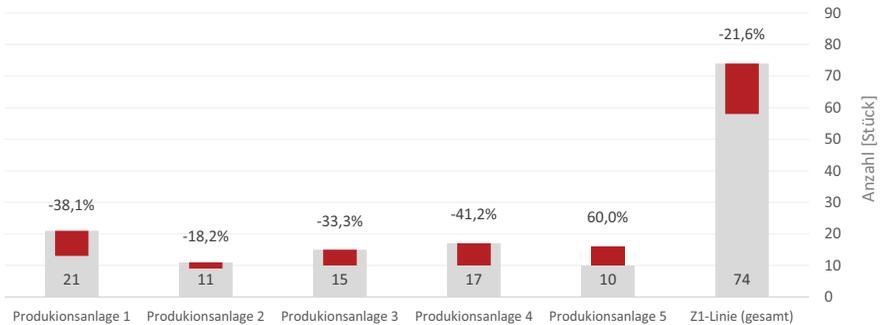


Abbildung 7-9: Auswertung der Abweichung vom Planungsstand hinsichtlich Stationen

einer jeweiligen Produktionsanlage große Abweichungen zwischen erzeugtem Mengengerüst durch den Digitalen Zwilling (reale Anlage) vorliegen, markiert in grau und dem „besten“ Planungsstand, Abweichung wiedergegeben in rot. Die Abbildung schildert die Abweichungen einzelner Produktionsanlagen von zwischen 18 und 60 Prozent bei den geplanten Stationen gegenüber der realen Z1-Linie. Die Validierung der Ressourcen dokumentiert, dass es je nach Anlagenkomponenten Roboter, Fertigungsverfahren, Messtechnik oder Handhabungsgeräte unterschiedlich ausgeprägte Abweichungen zwischen dem Planungsstand und dem durch den Digitalen Zwilling erzeugten Mengengerüst (reale Anlage) gibt. Abbildung 7-10 verdeutlicht exemplarisch die quantitative Abweichung des Planungsstandes am Beispiel der Roboter sowie Fertigungsverfahren 1 und Fertigungsverfahren 2. Die Abbildung 7-10 hält fest, dass die Anzahl der Roboter in den Produktionsanlagen 3, 4 und 5 deutlich zwischen dem Planungsstand und der realen Produktionsanlage abweicht. Da sich positive und negative Abweichungen bei der Anzahl der Roboter für mehrere Produktionsanlagen ausgleichen, ergibt sich im gesamten Z1-Bereich eine deutlich niedrigere Abweichung von insgesamt -6,1 Prozent. Diese Beobachtung, dass es pro Produktionsanlage größere Abweichungen als in der gesamten Z1-Linie vorkommen, ist ebenso beim Fertigungsverfahren 1 zu machen. Dies ist darin begründet, dass sich positive und negative Abweichungen (rot) einzelner Produktionsanlagen auch beim Fertigungsverfahren 1 für die gesamte Z1-Linie wieder ausgleichen. Beim Fertigungsverfahren 1 gibt es bei der Z1-Linie im Gesamten sogar keine Abweichung zwischen Planungsstand und realem Produktionssystem. Ebenso liegen große Abweichungen bei Fertigungsverfahren 2 in den einzelnen Produktionsanlagen vor. In der gesamten Z1-Linie weicht die Anzahl des Fertigungsverfahrens 2 wieder weniger mit -17,9 Prozent ab. Dieser allgemeine Trend, dass es für die gesamte Z1-Linie deutlich geringere Abweichungen zwischen

Planungsstand (rot) und realem Produktionssystem vorliegt, bestätigt sich ebenfalls in den Auswertungen des Fertigungsverfahrens 3, der Handhabungsgeräte und Messtechnik.

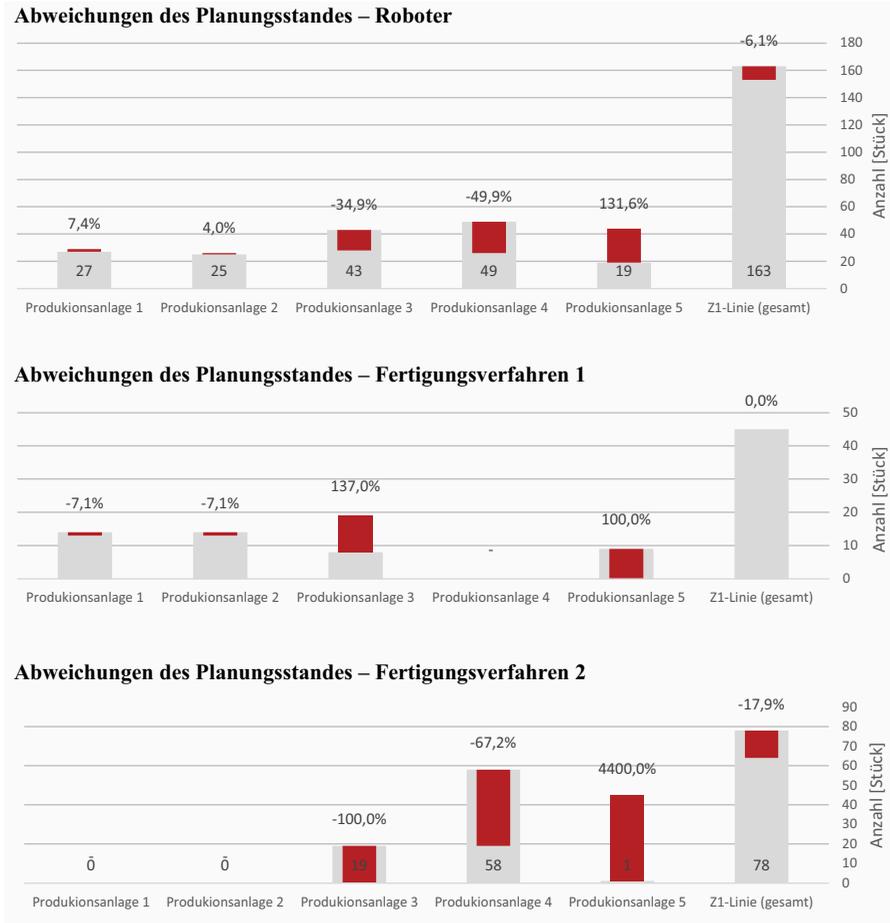


Abbildung 7-10: Quantitative Auswertung der Abweichung von Ressourcen im Planungsstand

Somit veranschaulicht die quantitative Validierung der vorhandenen Struktur und Ressourcen, dass eine große Differenz zwischen „bestem“ Planungsstand und realem Produktionssystem gibt, die durch die entwickelte Methodik geschlossen werden kann. Die Validierung an echten Datensätzen und einem realen Produktionssystem in der Automobilindustrie beweist, dass eine deutliche Verbesserung der Qualität hinsichtlich „Aktualität“ durch die entwickelte Methodik erreicht wird.

7.3.2 Qualitative Validierung der Aktualität des Planungsstandes

Als weiterer Ansatz zur Bemessung der Verbesserung der Datenqualität in der Metrik „Aktualität“ durch die entwickelte Methodik gegenüber dem besten vorhandenen Planungsstand zur Z1-Linie ist die qualitative Validierung. Die Auswertung der Anlagenstruktur in Produktionsanlage 2 demonstriert exemplarisch, dass die Stationen für kleine Stationsbezeichnungen übereinstimmen und bei höheren Stationsbezeichnungen ab „Station 100“ abweichen (Tabelle 7-4).

Tabelle 7-4: Auswertung der Anlagenstruktur Produktionsanlage 2

Produktionsanlage	SPS Bereich	Station	Digitaler Zwilling	reale Anlage	ursprünglicher Planungsstand
Produktionsanlage 2	SPS 1	010	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 2	SPS 1	020	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 2	SPS 1	030	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 2	SPS 2	040	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 2	SPS 2	050	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 2	SPS 2	060	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 2	SPS 2	070	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 2	SPS 2	080	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 2	SPS 3	090	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 2	SPS 3	100	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 2	SPS 3	110	Ja	Ja	Nein

Somit wurde die reale Produktionsanlage gegenüber der ursprünglichen Planung um die Station 100 und Station 110 erweitert. Diese Beobachtung, dass höhere Stationsbezeichnungen weniger übereinstimmen, ist ebenso bei der Produktionsanlage 3 (Tabelle 7-5) sowie bei Validierung der Produktionsanlage 1, Produktionsanlage 4 und Produktionsanlage 5 zu machen.

Tabelle 7-5: Auswertung der Anlagenstruktur Produktionsanlage 3

Produktionsanlage	SPS Bereich	Station	Digitaler Zwilling	reale Anlage	ursprünglicher Planungsstand
Produktionsanlage 3	SPS 1	010	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 3	SPS 1	020	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 3	SPS 1	030	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 3	SPS 1	040	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 3	SPS 1	050	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 3	SPS 2	060	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 3	SPS 2	070	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 3	SPS 2	080	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 3	SPS 2	090	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 3	SPS 2	100	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 3	SPS 3	110	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 3	SPS 3	120	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 3	SPS 4	125	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 3	SPS 3	130	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 3	SPS 3	140	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 3		95	Nein	Nein	Ja

Bei der Produktionsanlage 3 kommt beispielsweise dazu, dass die „Station 95“ ursprünglich geplant wurde, jedoch zum Zeitpunkt der Überprüfung gar nicht in der realen Produktionsanlage vorhanden ist. Die qualitative Abweichung der Stationen gegenüber ursprünglich geplanten Anlagenstruktur ergibt, dass der Planungsstand nur 64 Prozent der realen Stationen der fünf untersuchten Produktionsanlagen enthält. Die qualitative Validierung der Ressourcen des Planungsstandes gegenüber den Ressourcen des Digitalen Zwillings zeigt ebenfalls eine große Verbesserung der *Aktualität* durch die Anwendung der entwickelten Methodik. Abbildung 5-11 bestätigt das Ergebnis der qualitativen Validierung geplanter Anlagenkomponenten in den jeweiligen Stationen für die Produktionsanlagen eins bis fünf. Die Auswertung ergibt drei verschiedene Fälle. Im ersten Fall stimmt die geplante Anlagenkomponente mit der vor Ort überein (blau). Im zweiten Fall ist eine Anlagenkomponente vor Ort, die aber nicht im Planungsprojekt enthalten ist (grau). Im dritten Fall ist eine Anlagenkomponente geplant gewesen, diese ist jedoch in der Anlage vor Ort fehlend (rot). Die qualitative Auswertung demonstriert, dass bei allen Produktionsanlagen häufiger Anlagenkomponenten vorhanden sind, die ursprünglich nicht für jeweilige Station eingeplant waren (grau), als Anlagenkomponenten, die eingeplant waren (blau).

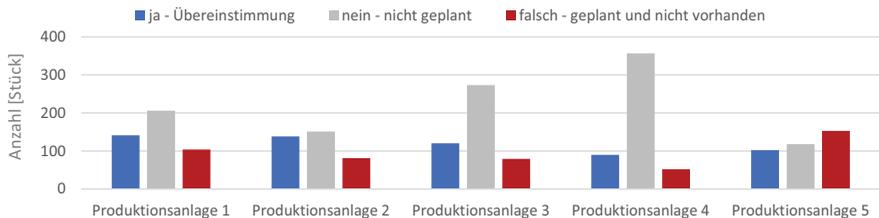


Abbildung 7-11: Ergebnis qualitative Auswertung nach geplanten Anlagenkomponenten

Hinzu kommt ein sehr großer Anteil an für eine Station eingeplanter Anlagenkomponenten in der realen Produktionsanlage, der nicht vorhanden ist (rot). Im Durchschnitt aller fünf untersuchten Produktionsanlagen der Z1-Linie ergibt sich durch die qualitative Auswertung eine Übereinstimmung von 34,8 Prozent geplanter Anlagenkomponenten gegenüber den durch den Digitalen Zwilling erzeugten bzw. real vorhanden Anlagenkomponenten. Hinzu kommen viele Anlagenkomponenten, die eingeplant, jedoch im Aufbau der realen Anlage nicht eingebaut wurden. Weitere detaillierte Abweichungen wie beispielsweise der richtige Robotertyp sind in dieser optimistischen Berechnung noch nicht einbezogen. Sonst fielen der Unterschied zwischen geplantem Stand und realer Anlage noch gravierender aus. Darüber hinaus liefert eine detailliertere Ansicht der qualitativen Validierung der

Anlagenkomponenten nach einzelnen Stationen weitere Erkenntnisse. Hierfür wird in Abbildung 7-12 die Übereinstimmung der Anlagenkomponenten in einzelnen Stationen am Beispiel der Produktionsanlage 2 aufgeführt.

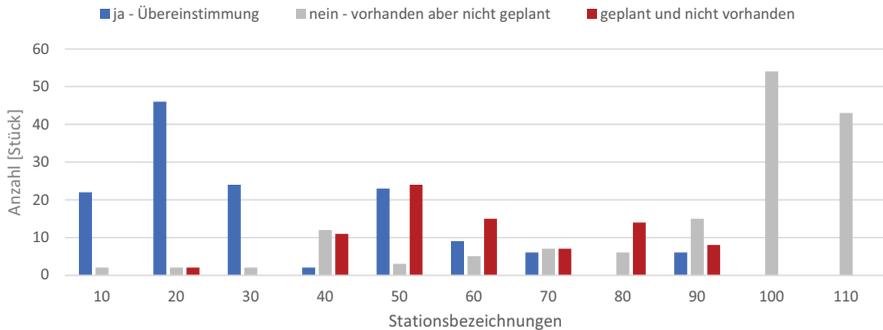


Abbildung 7-12: Qualitative Auswertung der Anlagenkomponenten Produktionsanlage 2

In der Abbildung ist zu erkennen, dass bei niederen Stationsbezeichnungen relativ viele Anlagenkomponenten übereinstimmen (blau). Bei höheren Bezeichnungen stimmen dagegen die geplanten Anlagenkomponenten nicht mehr mit der realen Station in der Produktionsanlage überein. Ähnliche Grafiken ergeben sich ebenso bei den anderen Produktionsanlagen. Dieses Muster deutet darauf hin, dass die Stationen und Einzelkomponenten während der Detaillierung in der Engineering-Phase in einzelnen Stationen geändert und umstrukturiert wurden. Die erste Station in jeder Anlage steht im Einklang mit dem Plan, dann nimmt die Übereinstimmung ab, da dann die entsprechenden Anlagenkomponenten anders auf die jeweiligen Stationen verteilt worden sind.

7.3.3 Evaluation zur Verbesserung der Datenqualität durch den Digitalen Zwilling

Sowohl die qualitative als auch die quantitative Validierung der Aktualität des ursprünglichen Planungsstandes haben gezeigt, dass eine automatisierte Verbesserung der Datenqualität in der Metrik „Aktualität“ durch die entwickelte „*Methodik eines Digitalen Zwillings zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau*“ gegenüber dem neusten Planungsstand erlangt wird. Quantitativ und qualitativ wird eine automatisierte Verbesserung der Datenqualität hinsichtlich Stationsabfolge, Fahrzeugmodelle und -varianten, Fügepunkte sowie Fahrzeugteile um 100 Prozent erreicht. Beim Mengengerüst der Ressourcen wird eine quantitative Verbesserung der Datenqualität bei der Anzahl der Stationen je nach Produktionsanlage zwischen 18 und 60 Prozent erwirkt. Bei der Anzahl der Roboter kann die

Datenqualität quantitativ je nach Produktionsanlage zwischen 4 und 131 Prozent gesteigert werden. Da sich positive und negative Abweichungen einzelner Produktionsanlagen ausgleichen, ergeben sich für die Z1-Linie insgesamt geringere Abweichungen. Ebenso wurde eine deutliche Erhöhung der Datenqualität hinsichtlich der *Aktualität* gegenüber dem ursprünglichen Planungsstand, den einzelnen Fertigungsprozessen, Handhabungsgeräte und Messtechnik validiert.

Qualitativ betrachtet ist eine noch deutlichere Verbesserung der Datenqualität möglich. So wird die *Aktualität* der Struktur durch die entwickelte Methodik um 36 Prozent erhöht. Die Datenqualität der Anlagenkomponenten kann sogar um über 65 Prozent verbessert werden. Die bisher in einem Planungsprojekt nicht vorhandenen, jedoch relevanten Prozess- und Produktinformationen (Abschnitt 5.2) konnten durch die entwickelte Methodik erstmals automatisiert sowie aktuell und vollständig aus einer realen Produktionsanlage generiert werden. Somit ist die Verbesserung der Datenqualität in der Metrik *Aktualität* gegenüber dem ursprünglichen Planungsprojekt für alle fünf relevanten Informationen hinsichtlich der Integrationsplanung nachgewiesen. Gegenüber der heutigen manuellen Bestandsaufnahme, die nur ein Mengengerüst der Ressourcen enthält, wird somit ebenfalls eine Verbesserung der Datenqualität erreicht.

7.4 Szenario 3 – Transparenz im komplexen Karosserierohbau

In Szenario 3 wird die entwickelte Methodik angewendet, um die Änderungen während des Anlagenlebenszyklus der Produktionsanlage zu untersuchen und damit die Schaffung von *Transparenz* aufzuzeigen. Mithilfe der entwickelten *Methodik eines Digitalen Zwillings zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau* werden Änderungen während des Anlagenlebenszyklus im Zeitraum von über 3 Jahren am Beispiel *Mengengerüst* der Ressourcen (exemplarisch für Stammdaten) und am Beispiel Schweißpunkte (volatile Daten) untersucht.

7.4.1 Identifikation von Änderungen am Beispiel Mengengerüst der Ressourcen

Die Validierung zeigt, dass es sowohl im Zeitraum zwischen Mai 2017 und Mai 2019 als auch zwischen Mai 2019 und Juni 2020 Umbauten an den untersuchten Produktionsanlagen gegeben hat (siehe Abbildung 7-13). Die Abbildung zeigt, dass in den fünf untersuchten Produktionsanlagen der Z1-Linie hauptsächlich eine Erweiterung um Anlagenkomponenten stattgefunden hat. Gleichzeitig gab es einen geringen Rückbau von nicht mehr benötigten Anlagenkomponenten. Im Zeitraum zwischen Mai 2017 und Mai 2019 fand beispielsweise eine Ergänzung um einen Roboter mit Greifer, eine Ablagestation sowie mehrere Lichtschranken und Lesegeräte für das RFID-System statt.

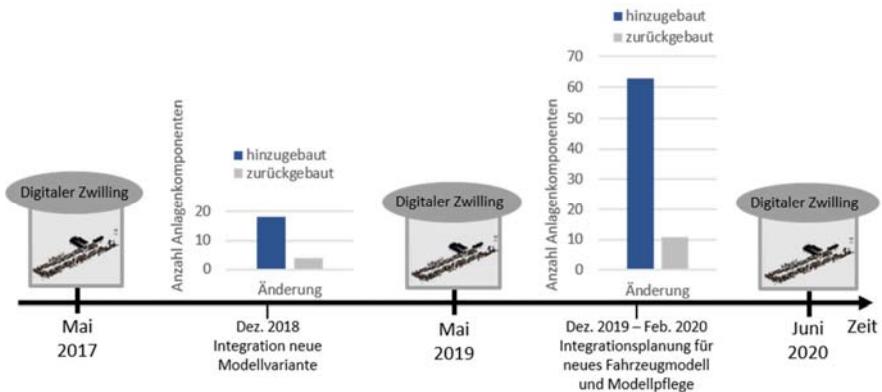


Abbildung 7-13: Änderungen im Mengengerüst der Ressourcen

Ebenso erfolgte ein Abbau beispielsweise von einer nicht mehr benötigten Ablagestation. In Zeitraum zwischen Mai 2019 und Juni 2020 kam es zu einer Erweiterung um flexible Anlagenkomponenten an den Vorrichtungen in den untersuchten Produktionsanlagen. Dieser Umbau ermöglicht zukünftig die Aufnahme weitere Karosserieteile durch die bestehenden Vorrichtungen. Der Digitale Zwilling zeigt, dass hier außerdem zusätzliche Lesegeräte zur Nachverfolgung neuer Fahrzeuggestelle installiert worden sind. Zur „Schaffung von Transparenz“ hinsichtlich Änderungen im Mengengerüst der Ressourcen eigneten sich insbesondere die Generierung der Ressourcenstruktur (erste drei Bausteine der Methodik).

7.4.2 Identifikation von Änderungen am Beispiel Schweißpunkte

Die Auswertung der Prozessdaten veranschaulicht, dass während des untersuchten Zeitraumes zwischen Mai 2017 und Juni 2020 keine neuen Fügepunkte in die Roboter der Produktionsanlagen implementiert wurden. Die Anzahl und Bezeichnung der Schweißpunkte und deren Zuordnung zu einem jeweiligen Roboter hat sich somit für die gesamte Produktionsanlage nicht geändert. Abbildung 7-14 gibt die Änderungen der Positionen von Schweißpunktkoordinaten am Beispiel von zwei Fahrzeugvarianten (Variante 1 LL LS1 und Variante 3 LL LS2) wieder, die am Roboter vorgenommen wurden. In der Abbildung sind Optimierungen der Schweißpunktpositionen für zwei verschiedene Varianten dargestellt. Auf der Abbildung ist zu sehen, dass im Zeitraum von März 2019 bis Juni 2020 größere Änderungen an den einzelnen Schweißpunkten, die im jeweiligen Roboter konfiguriert sind, vorgenommen wurden. Die Auswertung demonstriert, dass sich die entwickelte

Methodik zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität eignet, um Änderungen in der Produktionsanlage für eine Integrationsplanung transparent darzustellen.

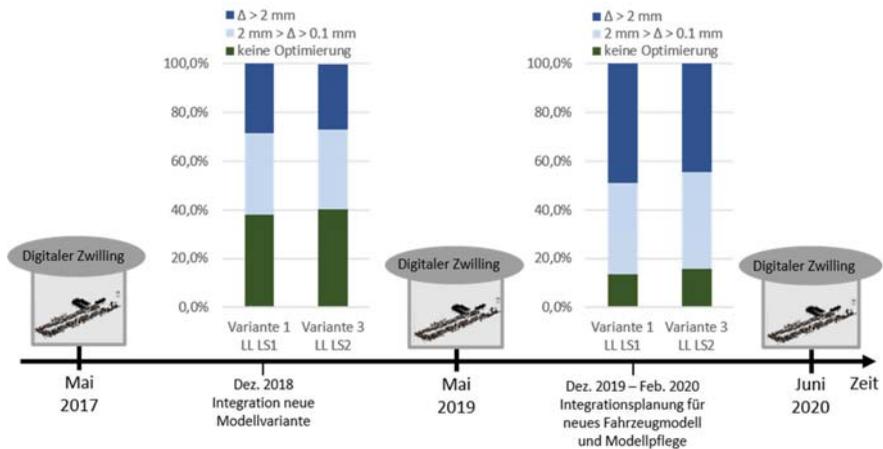


Abbildung 7-14: Optimierungen am Beispiel Schweißpunkte

7.5 Evaluation

Auf Basis der durchgeführten Szenarien dieser Fallstudie erfolgt die Bewertung der Methodik gemäß den definierten Anforderungen (vergleiche Kapitel 2.4). Hierbei werden ebenfalls die Teilfragen sowie die wissenschaftliche Leitfrage beantwortet. Des Weiteren sind die Erkenntnisse dieser Arbeit in den literarischen und anwendungsorientierten Kontext eingeordnet.

7.5.1 Bewertung der Methodik

Die Bewertung der Methodik stützt sich auf die durchgeführte Verifikation und Validierung. Aufbauend auf die Verifikation durch den Softwaredemonstrator (Kapitel 6) wurde die Methodik anhand der Fallstudie hinsichtlich der „Vollständigkeit relevanter Informationen“, einer „Verbesserung der Aktualität“ und der „Schaffung von Transparenz“ validiert. Abbildung 7-15 veranschaulicht die Verifikation und Validierung der einzelnen Bausteine der entwickelten Methodik. Im Folgenden wird die Methodik gemäß den definierten Anforderungen betrachtet und bewertet.

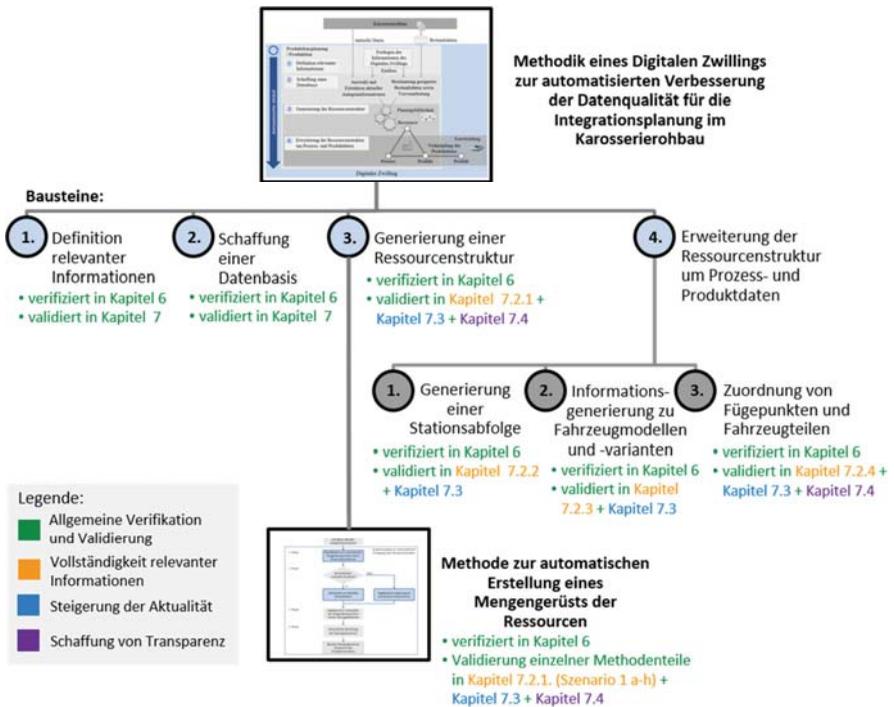


Abbildung 7-15: Übersicht der durchgeführten Verifikation und Validierung an einer vereinfachten Darstellung der Methodik

Anforderung 1: Die Methodik muss automatisiert ablaufen und auf das komplexe Produktionssystem „Karosserierohbau“ skalierbar sein. Bei der Anwendung der Methodik ist die Gefahr einer Störung in der laufenden Produktion auszuschließen.

Teilfrage 1: Was ist bei der Umsetzung der Methodik zu beachten, um die Skalierung auf das komplexe System „Karosserierohbau“ zu bewerkstelligen und einen automatisierten Ablauf zu ermöglichen?

Antwort auf die Teilfrage 1: Die Verifikation anhand des Software-Demonstrators (Kapitel 6) hat am Beispiel der Fallstudie gezeigt, dass die Methodik automatisiert und auf ein komplexes System skaliert werden kann, wenn die relevanten Datenquellen im Produktionssystem bei der Ausgestaltung bestimmt sind (vergleiche Kapitel 7.2). In einem komplexen Produktionssystem wie einem

Karosserierohbau liegen zahlreiche Daten und Datenquellen vor, die Beziehungen untereinander haben. Ebenso ist es möglich, auf unterschiedliche Weisen an bestimmte Daten zu kommen, die zum Teil in verschiedener Form mehrfach zu identifizieren sind. Deshalb ist die Fokussierung auf die für den Digitalen Zwilling relevanten Daten sowie die Bewertung und Auswahl der Datenquellen, die die Daten enthalten, von fundamentaler Bedeutung, um eine Automatisierung und Skalierung der Methodik auf ein komplexes Produktionssystem realisieren zu können (siehe Kapitel 5.1 und 5.2). Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist, die Nutzung einer vorhandenen Standardisierung im Hinblick auf Bezeichnungen und Geräte zu nutzen. Ebenso wichtig ist die Einbeziehung der vorhandenen Planungsbibliothek.

Teilfrage 2: Wie kann die Gefahr einer Störung des laufenden Produktionsbetriebs bei der Anwendung der Methodik ausgeräumt werden?

Antwort auf die Teilfrage 2: Feldtests an mehreren Produktionsanlagen eines Karosserierohbaus, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass Online-Auswertungen im Produktionssystem durch Echtzeitsysteme Störungen an der Produktion bis hin zu Stillständen der Produktion verursachen können. Durch das Auslesen von Offlinekonfigurationen besteht dagegen keine Gefahr eines Produktionsstillstandes. Die Datenextraktion aus Offlinekonfigurationen von SPS und Robotern stellt damit einen wesentlichen Beitrag zur Lösung dar (vergleiche Kapitel 5.2.1.).

Im Hinblick auf die **Anforderung 1** hat sich durch die Anwendung des Softwaredemonstrators innerhalb der Fallstudie gezeigt, dass ein automatisierter Ablauf der Methodik im untersuchten Bereich der Z1-Linie möglich ist. Notwendige Daten zu den entsprechenden Fahrzeugen mussten bereits im Vorfeld aus einer Datenbank des Automobilunternehmens extrahiert werden, da ein direkter Zugriff auf die Datenbank durch eine Anwendung nicht erlaubt ist. Deshalb wird von einer automatisierten und keiner automatischen Verbesserung durch die Methodik gesprochen. Stehen diese Daten zur Verfügung, kann der Digitale Zwilling ein aktuelles Abbild der untersuchten Z1-Linie des Karosserierohbaus mit allen relevanten Informationen für die Integrationsplanung automatisch innerhalb von weniger Minuten erstellen. Um eine Skalierbarkeit der Methodik zu erreichen, wurde der Digitale Zwilling auf Basis des vorhandenen Standards aufgebaut. Im untersuchten Karosserierohbau der Mercedes-Benz AG war dies der sogenannte „Integra Standard“. Dieser Standard beschreibt, wie Geräte innerhalb der Produktion bezeichnet werden müssen. Zusätzlich umfassen diese Standard-Vorgaben unter anderem die Bezeichnungen zur Strukturierung innerhalb der Produktion. Ein solcher Standard ist unbedingt notwendig, um die entwickelte Methodik entsprechend auf größere Produktionsbereiche skalieren zu können. Ein weiterer

maßgeblicher Beitrag zur Skalierbarkeit der Methodik brachte die Nutzung der standardisierten Planungsbibliothek. In der Planungsbibliothek sind alle im Karosserierohbau verbauten Anlagenkomponententypen vorhanden. Es handelt sich hierbei um eine begrenzte Anzahl an Anlagenkomponenten, damit beim Einkauf Skaleneffekte genutzt werden können. Diese Planungsbibliothek spielt im Hinblick auf die Skalierung der Methodik eine wesentliche Rolle, da hier alle relevanten Anlagenkomponenten eines Karosserierohbaus enthalten sind. Zusammenfassend lässt sich das Fazit ziehen, dass die Skalierbarkeit der Methodik anhand der Erprobung an fünf Produktionsanlagen innerhalb der Fallstudie mit insgesamt über 150 Robotermodulen und mehr als 1500 Anlagenkomponenten aufgezeigt werden konnte. Damit ist die prinzipielle Skalierbarkeit sowie eine Automatisierbarkeit der Methodik innerhalb eines komplexen Produktionssystems nachgewiesen worden. Bei der Entwicklung wurde die Methodik so gestaltet, dass lediglich lesend auf Offlinekonfigurationen der Anlagenkomponenten des Karosserierohbaus zugegriffen wird. Dadurch kann eine potenzielle Störung des laufenden Produktionsbetriebs durch die Methodik ausgeschlossen werden. Somit erfüllt die entwickelte Methodik die Anforderung 1.

Anforderung 2: Die Methodik muss einen Digitalen Zwilling für die Integrationsplanung vollständig erzeugen.

Teilfrage 3: Wie lässt sich ein aktuelles Mengengerüst der Ressourcen, bestehend aus hierarchischer Planungsstruktur und Ressourcen vollständig erstellen?

Antwort auf die Teilfrage 3: Die Validierung des Szenarios 1 (siehe Kapitel 7.2.1.) hat gezeigt, dass ein aktuelles Mengengerüst der Ressourcen, bestehend aus hierarchischer Planungsstruktur und Ressourcen durch die in Kapitel 5.3 vorgestellte „Methode zur automatischen Erstellung eines Mengengerüsts der Ressourcen“ nahezu vollständig erstellt werden kann. Aufbauend auf einen geeigneten Ansatz zur Extraktion relevanter Informationen aus dem Produktionssystem erlaubt die Methode die notwendige Abbildung einzelner Spanner und Stifte als Unterkomponenten bis hin zur Feldebene. Die Nutzung vorhandener Standardisierung und die Verknüpfung der Anlageninformationen mit der Planungsbibliothek sind auch hier Schlüsselemente zur automatischen Erzeugung eines vollständigen Mengengerüsts der Ressourcen.

Teilfrage 4: Wie können aktuelle Prozessinformationen – wie eine Stationsabfolge einzelner Fertigungsstationen – automatisiert generiert werden?

Antwort auf die Teilfrage 4: Die Stationsabfolge im Karosserierohbau lässt sich durch die „Methode zur automatischen Generierung einer Stationsabfolge“ erstellen. Die Validierung des patentierten Ansatzes in Szenario 1 (siehe Kapitel 7.2.2.) hat gezeigt, dass die vollständige Identifikation von

Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen innerhalb der Fertigung im Karosserierohbau realisierbar ist. Lediglich die automatische Generierung der sich über der Fertigung befindenden Bauteilzufuhr (Logistik) ist nicht möglich.

Teilfrage 5: Wie können einer fertigenden Ressource in einem Karosserierohbau aktuelle Produktinformationen, die zur Integrationsplanung erforderlich sind, automatisiert zugeordnet werden?

Antwort auf die Teilfrage 5: Durch die Ansätze „Informationsgenerierung für Fahrzeugmodelle und -varianten“ (Kapitel 5.4.2.) und „Identifikation von Fügepunkten und Fahrzeugteilen“ (Kapitel 5.4.3.) ist eine automatisierte Zuordnung aktueller Produktinformationen einer fertigenden Ressource im Karosserierohbau möglich. Diese Ansätze ermöglichen es, alle relevanten Prozess- und Produktinformationen einer entsprechenden Ressource in der Fertigung sowie den dazugehörigen Fertigungsstationen zu verknüpfen. Dabei kann der entwickelte Ansatz die Information der Fügepunkte mit zusätzlichen Prozessinformationen dem Mengengerüst der Ressourcen zuordnen. Zweckmäßige Informationen für die Integrationsplanung sind beispielsweise, ob es sich um einen Geopunkt oder Ausschweißpunkt handelt sowie die Fahrzeugkoordinaten, an denen der Fügepunkt ein Fahrzeugteil zusammenschweißt. Weitere für die Integrationsplanung relevante Informationen wie Fahrzeugmodelle und dem Zusammenbau der Fahrzeugteile können dadurch ebenfalls dem entsprechenden Roboter sowie der Station, in der sich die Ressourcen befinden, zugeordnet werden. Der Nachweis der korrekten Funktion der Ansätze innerhalb der entwickelten Methodik ist in Kapitel 7.2.4 und 7.2.5 detailliert dargestellt.

Auf Basis von Szenario 1 zum Nachweis der Vollständigkeit an fünf Produktionsanlagen, die insgesamt mehr als 150 Robotermodule und über 1500 Anlagenkomponenten umfassen, lässt sich im Hinblick auf die **Anforderung 2** folgendes Fazit ziehen. Szenario 1 belegt die nahezu vollständige Abbildung für die Integrationsplanung relevanter Informationen durch den Digitalen Zwilling. Beim Mengengerüst der Ressourcen konnte die Anlagenstruktur vollständig erzeugt werden, die Ressourcen in der Produktionsanlage konnten mit einer „Vollständigkeit“ von 97,7 Prozent validiert werden. Weitere 1,4 Prozent der Ressourcen waren wegen beschränkter Zugangsberechtigung im Karosserierohbau nicht kontrollierbar. Die Methodik erlaubt es außerdem, einzelne Unterkomponenten wie Spanner und Stifte eines Greifers abzubilden. Die Validierung der Stationsabfolge sowie die Informationen über die Fahrzeugmodelle, Fügepunkte und den Zusammenbau der Fahrzeugteile in einzelnen Stationen stimmen vollständig mit der realen Z1-Linie überein (vergleiche Kapitel 7.2). Auf Basis dieser Auswertungen zur Vollständigkeit der relevanten

Informationen in Kapitel 7.2 konnte dargelegt werden, dass die Methodik die Anforderung 2 „Vollständigkeit“ erfüllt.

Anforderung 3: Die Methodik muss die Datenqualität gegenüber dem aktuell bestehenden Planungsstand zur Produktionsanlage in der Datenqualitätsmetrik „Aktualität“ steigern.

Teilfrage 6: Welche Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung kann im Hinblick auf die Aktualität durch einen Digitalen Zwilling erreicht werden?

Antwort auf die Teilfrage 6: Die Untersuchungen in dieser Abhandlung haben ergeben, dass eine deutliche Verbesserung der „Aktualität“ gegenüber vorhandenen Planungsständen sowohl quantitativ (Kapitel 7.3.1.) als auch qualitativ (Kapitel 7.3.2) erreicht wird. Die quantitative Auswertung zeigt eine Verbesserung der Aktualität von 22 Prozent bei der Anzahl an Stationen und 6 Prozent bei der Anzahl an Robotern innerhalb der gesamten Z1-Linie möglich ist. Die Verbesserung der Aktualität in jeder der fünf untersuchten Produktionsanlagen der Z1-Linie für sich allein ist hierbei deutlich höher, da sich die positiven und negativen Abweichungen zwischen Planungsstand und Digitalem Zwilling innerhalb der gesamten Z1-Linie gegenüber einzelnen Produktionsanlagen etwas ausgleichen. Qualitativ betrachtet konnte die Datenqualität in der Metrik „Aktualität“ hinsichtlich der Struktur um durchschnittlich 36 Prozent und mit Blick auf die Anlagenkomponenten um durchschnittlich 65 Prozent verbessert werden. Bei Prozess- und Produktinformationen war eine Erhöhung der Datenqualität in der Metrik „Aktualität“ um 100 Prozent möglich, da diese nicht im ursprünglichen Planungsstand enthalten sind.

Im Hinblick auf die **Anforderung 3**, einer Verbesserung der Datenqualität in der Datenqualitätsmetrik „Aktualität“ wurde in Szenario 2 eine Verbesserung der „Aktualität“ gegenüber dem „aktuellsten“ Planungsstand vor der Integrationsplanung an der Z1-Linie (im Jahr 2019) aufgezeigt. Diese Auswertung konnte ebenfalls an fünf Produktionsanlagen mit über 150 Robotern und mehr als 1500 Anlagenkomponenten erfolgen. In Kapitel 7.3 wurde eine Verbesserung in der Qualitätsmetrik „Aktualität“ sowohl quantitativ als auch qualitativ nachgewiesen. Die Auswertungen zeigen eine quantitative Verbesserung der *Aktualität* innerhalb der fünf Produktionsanlagen zwischen 18 und 60 Prozent gegenüber den geplanten Stationen. Die Anzahl der geplanten Roboter weicht für die einzelnen Produktionsanlagen im Planungsstand gegenüber dem Digitalen Zwilling bzw. der realen Produktionsanlage um zwischen -49,9 Prozent und +131,6 Prozent ab. Für die gesamte Z1-Linie weicht die Anzahl der geplanten Roboter um 6,1 Prozent gegenüber der realen Produktionsanlage ab. Auch die Anzahl der eingesetzten Fertigungsverfahren weicht in den Produktionsanlagen deutlich voneinander ab (vergleiche Abbildung 7-10). Innerhalb der Z1-Linie

heben sich die Differenzen zwischen einzelnen Produktionsanlagen wieder größtenteils auf sodass beispielsweise die Anzahl der Anlagenkomponenten von beispielsweise „Fertigungsverfahren 2“ für die gesamte Z1-Linie nur um 17,9 Prozent abweicht. Die qualitative Validierung verdeutlicht die Verbesserung der Datenqualität hinsichtlich „Aktualität“ noch mehr. So ergibt sich für die Z1-Linie eine Verbesserung der „Aktualität“, gemessen durch die Abweichungen zwischen dem Planungsstand und der realen Anlage bzw. dem Digitalen Zwilling von 36 Prozent im Hinblick auf die Struktur und im Hinblick auf die gesamten Anlagenkomponenten um 65 Prozent. Bei den Informationen zur Stationsabfolge, zum Fahrzeugmodell, zu den Fügepunkten und zum Zusammenbau der Fahrzeugteile ist eine Steigerung der Aktualität um 100 Prozent erfolgt, da hierzu keine Information verfügbar war. Zusammenfassend konnte durch Szenario 2 (Kapitel 7.3) in eine deutliche Verbesserung der *Aktualität* gegenüber dem aktuellen Planungsstand (zum Zeitpunkt der Auswertung) der Produktionsanlage sowohl quantitativ als auch qualitativ belegt werden. Somit erfüllt die entwickelte Methodik die Anforderung 3, eine „Verbesserung der Datenqualität“ in der Datenqualitätsmetrik „*Aktualität*“ gegenüber dem (zum Zeitpunkt der Auswertung) „neuesten“ Planungsstand zur Produktionsanlage.

Anforderung 4: Durch die Methodik ist Transparenz in den für die Integrationsplanungen relevanten Informationen im Karosserierohbau sicherzustellen.

Teilfrage 7: Wie kann die Transparenz bei der Integrationsplanung für die Planer sichergestellt und damit die digitale Komplexität verringert werden?

Antwort auf die Teilfrage 7: Szenario 3 hat demonstriert, dass es die entwickelte Methodik Transparenz sicherstellen kann, indem im komplexen Produktionssystem „Karosserierohbau“ Änderungen identifiziert und aktuell dargestellt werden (siehe Kapitel 7.4). Änderungen im Karosserierohbau sind durch den Abgleich unterschiedlicher Datenstände mithilfe des Digitalen Zwillings ermittelbar und können einem Planer aktuell visualisiert werden. Somit ist die transparente Darstellung von Umbauten und weiteren Änderungen innerhalb des Produktionssystems möglich. Durch eine Fokussierung auf die relevanten Informationen (Kapitel 5.1) und dem darauf aufbauenden Konzept zur „Auswahl und Extraktion aktueller Informationen aus der Produktionsanlage“ (Kapitel 5.2.1) sowie der „Auswahl geeigneter Bestandsdaten“ (Kapitel 5.2.2) ist es möglich, der Komplexität im Karosserierohbau zu begegnen. Gemäß Expertenbefragung ist durch die „Schaffung von Transparenz“ bei den relevanten Informationen für die Integrationsplanung eine Reduktion der (digitalen) Komplexität bei der Integrationsplanung um mehr als die Hälfte anzunehmen (Mittelwert 53 %, Standardabweichung 27 %, 22 Experten).

Teilfrage 8: Welche charakteristischen Änderungen hinsichtlich der Stammdaten (Ressourcen) und volatiler Daten (Produkt- / Prozessdaten) ergeben sich in einem Karosserierohbau während des Anlagenlebenszyklus?

Antwort auf die Teilfrage 8: Im Anlagenlebenszyklus eines Karosserierohbaus gibt es sowohl Änderungen hinsichtlich der Stammdaten (Ressourcen) als auch Änderungen hinsichtlich volatiler Daten. In Szenario 3 sind die Änderungen hinsichtlich Stammdaten (Kapitel 7.4.1) und hinsichtlich volatiler Daten (Kapitel 7.4.2) transparent dargestellt. Dabei wird aufgezeigt, dass sich die untersuchte Z1-Linie während des Anlagenlebenszyklus erweitert hat. Ebenso werden volatile Daten wie Fügepunkte in der Software der Roboter weiter optimiert.

Zur Überprüfung der „Sicherstellung von Transparenz“ - **Anforderung 4**, wurde in der Fallstudie dieser Arbeit das Szenario 3 an der Z1-Linie (mit über 1500 Anlagenkomponenten und mehr als 150 Roboter) durchgeführt. Durch Szenario 3 (Kapitel 7.4) konnte die praktische Anwendbarkeit der Methodik zur Identifizierung von Änderungen und somit zur Schaffung von Transparenz im komplexen Karosserierohbau exemplarisch am Beispiel des „Mengengerüsts der Ressourcen“ und an den „Schweißpunkten“ (vergleiche Abbildung 7-14) aufgezeigt werden. Die Anwendung der Methodik veranschaulicht exemplarisch die Änderungen im Mengengerüst der Ressourcen zwischen Mai 2017 und Mai 2019 sowie zwischen Mai 2019 und Juni 2020 (Siehe Abbildung 7-13). Gespräche mit Instandhaltern der Mercedes-Benz AG im Karosserierohbau der Z1-Linie haben die von der Methodik offengelegten Änderungen an der Produktionsanlage bestätigt. Dies ermöglicht es einem Planer im Rahmen einer Integrationsplanung mit der Methodik ein sehr gutes Bild über Änderungen an einer Produktionsanlage zu verschaffen, ohne selbst vor Ort zur Anlage zu gehen. Darüber hinaus demonstriert Szenario 3 sowohl die korrekte Funktion als auch die praktischen Möglichkeiten der entwickelten Methodik eines Digitalen Zwillings zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau. Aus den Ergebnissen der Szenarien lassen sich weitere Schlussfolgerungen interpretieren. So lässt sich aus Szenario 2 in Kombination mit Szenario 3 ableiten, welche Änderungen im Lebenszyklus eines Karosserierohbaus während der Engineering-Phase und während der laufenden Produktion stattfinden. Große Einblicke hinsichtlich der Änderungen während der Engineering-Phase erlaubt das zweite Szenario. Hier wurde eine große Abweichung des Planungsstandes gegenüber der realen Anlage ausgemacht und es wurde aufgezeigt, dass Stationen mit einer niedrigen Stationsnummer deutlich besser mit der realen Anlage übereinstimmen als Stationen mit einer größeren Stationsnummer. Dies zeigt, dass die Anlage während der Engineering-Phase deutlich umstrukturiert wurde. Diesen Sachverhalt bestätigt ein

Fachgespräch mit einem sehr erfahrenen Planer. Zum anderen gibt es in Szenario 3 im Vergleich zu Szenario 2 relativ geringe Änderungen an der Z1-Linie während der Betriebsphase. Somit wurde anhand der durchgeführten Fallstudie aufgezeigt, dass die entwickelte Methodik eine Sicherstellung der Transparenz für die Integrationsplanung im Karosserierohbau über weite Teile des Anlagenlebenszyklus vom ursprünglichen Planungsstand bis heute erlaubt. Dadurch ist die Anforderung 4 eine „Sicherstellung von Transparenz“ durch die entwickelte Methodik erfüllt. Zusätzlich beschreiben Planungsexperten in einer durchgeführten Umfrage (Biesinger et al. 2019a), dass sich die Komplexität für Planer bei Integrationsplanungen durch die „Sicherstellung von Transparenz“ mehr als halbiert.

Die Beantwortung der Teilfragen sowie die Erfüllung der Anforderungen geben somit Aufschluss über die Forschungsfrage: **„Wie kann ein Digitaler Zwilling die Datenqualität für Integrationsplanungen im Karosserierohbau automatisiert verbessern“?**

Antwort auf die Forschungsfrage: Durch die entwickelte Methodik des Digitalen Zwillings zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau ist dies möglich. Somit ist die entwickelte Methodik des Digitalen Zwillings die Antwort auf die Forschungsfrage. Die Verifikation in Kapitel 6 und die Validierung in Kapitel 7 sowie die Bewertung gemäß den Anforderungen haben gezeigt, dass alle Anforderungen an die Methodik umgesetzt wurden. Damit kann ebenfalls die Zielsetzung unter der Berücksichtigung der Randbedingungen „Aktualität und Vollständigkeit relevanter Informationen“, „automatisierter Ablauf“ sowie „Skalierung auf ein komplexes Produktionssystem“ vollständig erfüllt werden. Ein wesentlicher Wissensbeitrag dieser Abhandlung ist die Spezifikation eines Digitalen Zwillings für die Integrationsplanung im Karosserierohbau. Dieser enthält aktuelle Informationen zum Mengengerüst der Ressourcen, eine Stationsabfolge sowie Informationen zu den Fahrzeugmodellen, Fügepunkten, sowie Informationen zum Zusammenbau der Fahrzeugteile. Die vorgestellte Methodik wurde entwickelt, um die Datenqualität für Integrationsplanungen im Karosserierohbau durch einen Digitalen Zwilling automatisiert zu verbessern. Weiter konnten durch die Abhandlung Antworten sowohl auf wissenschaftliche als auch anwendungsrelevante Fragestellungen geliefert werden. Eine für die Produktionsplanung entscheidende Frage ist beispielsweise, wie sich Vorgaben hinsichtlich der Bestandsdaten an Zulieferer, die beträchtliche Kosten verursachen, auf einen zukünftigen Digitalen Zwilling auswirken, beantwortet werden (siehe Szenario 1b). Zusätzlich wurden auch Optimierungsvorschläge für eine Planungsbibliothek gegeben.

7.5.2 Einordnung der Ergebnisse in den literarischen und den anwendungsorientierten Kontext.

Die gewonnenen Erkenntnisse sind sowohl in der Wissenschaft als auch im anwendungsorientierten Umfeld von Bedeutung. DOMBROWSKI (Dombrowski et al. 2017) sieht in der Einführung des Digitalen Zwillings die Weiterentwicklung des Konzepts der Digitalen Fabrik, die einen wesentlich höheren Detaillierungsgrad aufweist. Nach EIBRICH (EiBrich 2019) ist die Abbildung eines aktuellen Mengengerüsts der Ressourcen ein wesentlicher Bestandteil des Digitalen Zwillings im Karosserierohbau. Für Produktionsplaner haben ebenso die Stationsabfolge sowie die aktuellen Informationen zu Fahrzeugmodellen, Fügepunkten und Informationen zum Zusammenbau der Fahrzeugteile, die in den jeweiligen Stationen gefertigt werden, einen erfassbaren Wert (Biesinger et al. 2019a). Die Methodik des Digitalen Zwillings zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität ermöglicht die transparente Darstellung dieser für die Integrationsplanung relevanten Informationen. OBERMAIER (Obermaier 2019, S. 22) sieht in der Bereitstellung entscheidungsrelevanter Informationen als Echtzeitabbild der Fertigung einen wesentlichen Beitrag zu Industrie 4.0. Neben dem Beitrag zu Industrie 4.0 bereitet die entwickelte Methodik eine Lösung für das Problem der schlechten Datenqualität von Bestandsdaten bei der Integrationsplanung in der täglichen Praxis bei Automobil-OEMs.

Zeiteinsparung und Kostenreduktion: Der in dieser Abhandlung vorgestellte automatisierte Ansatz zur Verbesserung der Datenqualität reduziert zudem Kosten, da er die ständige manuelle Bestandsaufnahme erübrigt. Der Ansatz reduziert Fehler (Santillan Martinez et al. 2018b) und bringt eine Zeitersparnis (Wallmüller 2017). Durch die Erprobung der Methodik anhand eines Demonstrators wurde nachgewiesen, dass die Bestandsaufnahme für die Integrationsplanung durch die automatische Erzeugung relevanter Informationen gegenüber einer manuellen Bestandsaufnahme deutlich beschleunigt werden konnte. Eine Reduktion des Zeitaufwandes bei einer Planung durch ein aktuelles digitales Abbild des Produktionssystems ist sowohl mit Blick auf die Anwendung als auch nach einer Analyse der Literatur belegt. BAUERNHANSL (Bauernhansl et al. 2014, S. 19) attestiert eine schnelle und akkurate Planung basierend auf aktuellen Daten. Dies bestätigen ebenfalls die befragten Planungsexperten in der Automobilindustrie. Nach ihrer Einschätzung ergibt sich aufgrund der Transparenz relevanter Informationen ein Zeitvorteil bei der Bestandsaufnahme und ein weiterer Zeitvorteil bei der eigentlichen Planung. Gleichzeitig identifizieren die Experten aus der Industrie weitere Nutznießer der Informationen, wie beispielsweise der Bereich Vorplanung, der Prüfaufträge und Vergleiche durchführt. Ebenso kann durch den Digitalen Zwilling der Anlage eine

Produktanpassung an die Anlage erfolgen, sodass kein oder nur ein geringerer Umbau bei der Integrationsaufgabe notwendig ist.

Verbesserung der Datenqualität: BAUERNHANSL (Bauernhansl et al. 2018, S. 71) beschreibt die Bereitstellung der richtigen Informationsqualität als eine der größten Herausforderungen zukünftiger Forschung. Die Auswertungen innerhalb der Fallstudie haben gezeigt, dass der Digitale Zwilling die Datenqualität hinsichtlich der Aktualität gegenüber dem vorhanden Planungsprojekt deutlich verbessert. Die aktuellen Informationen zur Produktionsanlage, die der Digitale Zwilling bereitstellt, führen wiederum zur Steigerung der Planungsqualität (Dombrowski et al. 2017), (Wallmüller 2017). Experten aus der Produktionsplanung sehen durch die Qualitätssteigerung relevanter Daten eine Verbesserung der Planungsqualität um über 70 Prozent als realistisch an (Biesinger et al. 2019a, S. 7).

Schaffung von Transparenz: Die Evaluierung der *Methodik des Digitalen Zwillings zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau* hat gezeigt, dass die Schaffung von Transparenz in einem komplexen System wie dem Karosserierohbau sichergestellt werden kann. Durch die „Schaffung von Transparenz“ ist es möglich, einen neuen Reifegrad in der Digitalisierung hin zur „Intelligenten Automatisierung basierend auf dem Digitalen Zwilling“ bei der Integrationsplanung zu erreichen (siehe Abbildung 7-16). Das Konzept der Digitalen Fabrik trug bisher dazu bei, die Transparenz und Planungsqualität innerhalb

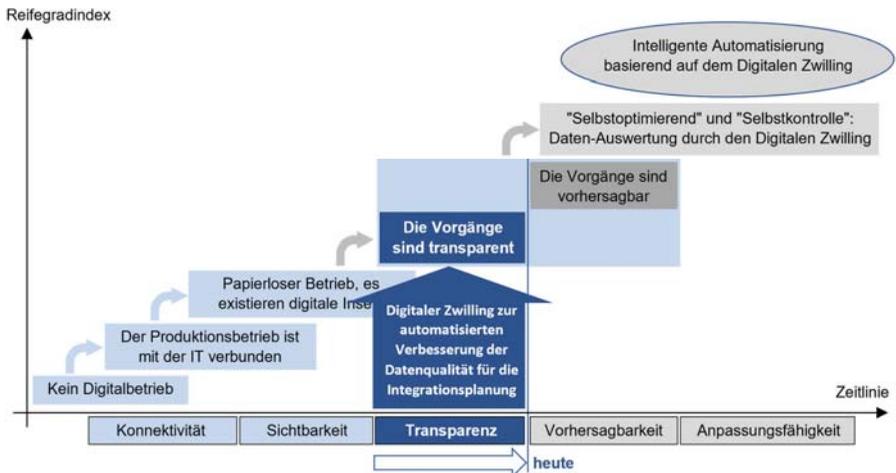


Abbildung 7-16: Einordnung der Ergebnisse in den Reifegradindex für Digitalisierung in Anlehnung an (Weyrich 2019)

der Produktionsplanung zu erhöhen (VDI-Richtlinie 4499 b). Somit kann die entwickelte Methodik auch als Weiterentwicklung innerhalb des Konzepts der Digitalen Fabrik verstanden werden. Zwar bleibt die Systemkomplexität des Karosserierohbaus auch weiterhin bestehen, jedoch konnte die digitale Komplexität (Lager 2020, S. 95) für Produktionsplaner durch den Digitalen Zwilling deutlich verringert werden. Durch die Selektion der relevanten Informationen, die der Digitale Zwilling abbildet, reduziert sich die digitale Komplexität für Planer um über 50 Prozent. Die Verringerung der Komplexität spart wiederum Kosten für das Unternehmen (Weyrich et al. 2017, S. 190). Die Digitalisierung trägt heute maßgeblich zur Lösung und Unterstützung von Problemen in Unternehmen bei (Block et al. 2018, S. 1351).

Übertragbarkeit der Methodik: In allen Produktionswerken eines Automobilherstellers weltweit werden im Karosserierohbau häufig dieselben Anlagenkomponenten und dieselbe Software eingesetzt, um Skaleneffekte im Einkauf zu erzielen. Ebenso gilt die unternehmensinterne Standardisierung für alle Karosserierohbausysteme weltweit. Insgesamt begünstigen diese Faktoren eine nachvollziehbare Übertragbarkeit der ausgeführten Methodik auf weitere Produktionssysteme innerhalb eines Produktionsnetzwerks. Die Übertragbarkeit der Methodik ist somit ebenfalls gegeben, wenn die Standardisierung und die Zusammensetzung der Anlagenkomponenten ähnlich den Bedingungen in einem Karosserierohbau sind. Damit kann die Methodik ebenfalls bei anderen variantenreichen Serienfertigungen eingesetzt werden. Wenn die entwickelte Methodik bei einem anderen automobil OEM oder variantenreichen Serienfertiger eingesetzt werden soll, so muss dieser keine Hardwareänderungen an seinem Produktionssystem vornehmen. Damit fallen keine Änderungskosten für die Hardware an. Die Kosten beziehen sich lediglich auf die Umsetzung der Methodik in einer Software. Somit ist mit einem geringen Kostenaufwand für die Implementierung der Software ein großer Nutzen (Verbesserung der Datenqualität) durch die vom Digitalen Zwilling zur Verfügung gestellten relevanten Informationen erreichbar. Der Beitrag dieser Abhandlung zum Wissen des „Design Science Research“ wird im Folgenden zusammengefasst. In Tabelle 7-6 ist der Beitrag dieser Abhandlung zum „Design Science“-Wissen in das „Design Science Research Grid“ in Anlehnung an VOM BROCKE UND MAEDCHE (vom Brocke und Maedche 2019) eingeordnet. Gemäß der Tabelle können somit acht zentrale Wissensbeiträge für das „Design Science Research“ – Wissen geliefert werden (W1 – W8).

Tabelle 7-6: Design Science Research Grid dieser Abhandlung

Digitaler Zwilling zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau		
<p>Problem:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fehlender Prozess zur Pflege von Bestandsdaten aufgrund hohem Kostendrucks - schlechte Datenqualität des Mengengerüsts als Basis zur Integrationsplanung neuer Fahrzeugmodelle - manuelle Bestandsaufnahme des Mengengerüsts zeitaufwendig und kostenintensiv - mangelnde Transparenz hinsichtlich aktueller und vollständiger Stationsabfolge und Fertigung von Fahrzeugmodellen, Fügepunkten und Zusammenbau der Fahrzeugteile in einzelnen Stationen innerhalb des Karosserierohbaus 	<p>Forschungsprozess:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Umfrage zu den Herausforderungen einer Integrationsplanung im Karosserierohbau bei einem internationalen Automobilunternehmen - „Design Science“-Forschungsprozess nach Vaishnavi - Evaluation an einer Fallstudie gemäß dem „Erstellungsprozess einer Fallstudie“ nach Albers 	<p>Lösung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Feldversuche und Bewertung der Datenquellen im Karosserierohbau zur Netzwerkanalyse (am Beispiel PROFINET-Analyse), Extraktion von Informationen aus Offlinekonfigurationen von SPS und Roboter sowie zu aktuellen Informationen über ein Echtzeitsystem am Beispiel des Manufacturing Service Bus - Softwaremodell des Demonstrators zur Umsetzung der Methodik - Validierung der Konzepte am realen Karosserierohbau - Zahlreiche Gespräche mit Instandhaltern im Karosserierohbau sowie mit Planungsexperten - Datentransfer des Mengengerüsts der Ressourcen in die Planungssysteme Line Designer (Siemens) und DELMIA DPE V5 (Dassault Systèmes) mithilfe von AutomationML bzw. PLM/XML - Optimierungsbeitrag für die standardisierte Planungsbibliothek zur Abbildung des Digitalen Zwillings
<p>Inputwissen:</p> <p>Stand der Technik</p> <ul style="list-style-type: none"> - Karosserierohbau - Planungsprozess und Integrationsplanung - Datenqualität - AutomationML - „Integra-Standard“ des Daimler AG - Automatisierungstechnik - Schnittstellenformate und technische Standards (z. B. AutomationML) - Unternehmensinterne Vorgaben zur standardisierten Umsetzung der Steuerungs- und Automatisierungstechnik im Karosserierohbau 	<p>Schlüsselkonzepte:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Schlankes Methodendesign, um die Komplexität zu verringern. - Konzept zur Extraktion relevanter Informationen aus Offlinekonfigurationen von SPS und Roboter - Methodik zur Identifikation aktueller Bestandsdaten - Verknüpfung von Informationen der Produktionsanlage mit der Planungsbibliothek - Generierung einer Stationsabfolge - Informationsobjekte und -flüsse 	<p>Wissensbeitrag:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Spezifikation eines Digitalen Zwillings für die Integrationsplanung im Karosserierohbau (W1) - Methode zur Identifikation aktueller (bzw. veralteter) Bestandsdaten (W2) - Vorgehensweise zur Erzeugung eines aktuellen und vollständigen Mengengerüsts der Ressourcen (W3) - Methode zur automatisierten Generierung einer Stationsabfolge (<i>patientiert</i>) (W4) - Bewertung hinsichtlich Notwendigkeit relevanter Vorgaben für Bestandsdaten an Anlagenlieferanten (W5) - Die Dissertation zeigt an einer konkreten Z1-Linie (fünf Anlagen) am Beispiel des Mengengerüsts der Ressourcen und der Schweißpunkte auf, was sich während der Produktion in 3 Jahren ändert. (W6) <p>Eine Methodik zur</p> <ul style="list-style-type: none"> - automatisierten Verbesserung der Datenqualität des Digitalen Zwillings für die Integrationsplanung (W7) - Schaffung von Transparenz im komplexen Karosserierohbau (W8)

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Automobilindustrie steht aktuell vor den enormen Herausforderungen, einerseits die Fahrzeugangebote hinsichtlich CO² neutraler Antriebstechnologien (Batterie und Brennstoffzelle) zu erhöhen und andererseits die Produktionskosten pro Fahrzeug erheblich senken zu müssen. Insbesondere Letzteres führt zu Einsparungen innerhalb der Produktion in Kombination mit einer steigenden Anzahl an Fahrzeugvarianten, wodurch es zu einer Zunahme an Fahrzeugintegrationen in bestehende Produktionssysteme kommt. Infolgedessen avanciert die Integrationsplanung zum wichtigsten Tätigkeitsfeld innerhalb der Produktionsplanung. Änderungen am Produktionssystem in Kombination mit mangelnder Pflege von Bestandsdaten und einem fehlenden Prozess zur Datenrückführung verursachen eine mangelhafte Datenqualität. Obsolete Bestandsdaten zur Produktionsanlage sind ein impraktikabler Aufsetzpunkt für eine zeiteffiziente Integrationsplanung. Planer benötigen zur Integrationsplanung aktuelle Informationen über das Produktionssystem. Diese Informationen müssen sowohl Ressourcen- als auch Produkt- und Prozessinformationen enthalten. Die Literatur weist aus, dass sich die relevanten Informationen für die Integrationsplanung aus einem „Mengengerüst der Ressourcen“, einer Stationsabfolge, Informationen zu Fahrzeugmodellen und -versionen, Fügepunkten sowie Fahrzeugteilen, die in einer jeweiligen Fertigungsstation bearbeitet werden, zusammensetzen. Die Bestätigung dieser relevanten Informationen erfolgte durch eine von der Literatur unabhängig durchgeführte Umfrage mit 22 Fachexperten und Führungskräften in der Produktionsplanungsabteilung eines internationalen Automobilherstellers. Die manuelle Bestandsaufnahme dieser Informationen ist in einem komplexen Produktionssystem wie einem Karosserierohbau sehr zeitaufwendig, kostenintensiv und zudem fehleranfällig. Um diese Nachteile ausräumen zu können, stellt sich aus wissenschaftlicher Sicht die Herausforderung, eine Methodik zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung zu entwickeln. Diese Arbeit zeigt, dass sich besonders die Inanspruchnahme des Konzepts des Digitalen Zwillings dafür eignet, das Problem der schlechten Datenqualität zu lösen. Die in dieser Abhandlung entwickelte Methodik ist nach dem Forschungsprozess des „Design Science Research“ konzipiert. Eine ausführliche Reflexion des Standes der Wissenschaft und Technik zum Thema „Digitaler Zwilling“ offenbart im Ergebnis, das bisher nur rudimentäre Ansätze zur automatisierten Erzeugung und zur Skalierung der Ansätze auf komplexe Produktionssysteme wie beispielsweise einen

Karosserierohbau vorhanden sind. Trotz der bereits zahlreich vorliegenden Publikationen zum Thema „Digitaler Zwilling“ wird in der Regel der Engineering-Prozess innerhalb der Produktion betrachtet und es fehlen bisher Anwendungen eines Digitalen Zwillings für die Planung. In dieser Abhandlung wird erstmals der Digitale Zwilling spezifisch für die Integrationsplanung definiert. Die Inhalte des Digitalen Zwillings für die Integrationsplanung sind das aktuelle Mengengerüst der Ressourcen, die Informationen zur Stationsabfolge, die Informationen zu den Fahrzeugmodellen, Fügepunkten und zu den Daten bezüglich des Zusammenbaus der Fahrzeugteile. Die Identifikation und Auswahl relevanter Informationen ist ein obligatorischer Schritt, um die digitale Komplexität bei einer Integrationsplanung zu reduzieren. Dies ist der erste Vorgang hinsichtlich der zu entwickelten vierstufigen Methodik. Die Methodik setzt sich aus mehreren Methoden zusammen, die zum Teil bereits im Rahmen dieser Arbeit patentiert worden sind. Die Schaffung einer geeigneten Datenbasis für die benötigten Informationen wird im zweiten Schritt umgesetzt. Die Datenbasis setzt sich zum einen aus aktuellen Informationen der Produktionsanlage und zum anderen aus vorhandenen Bestandsdaten zusammen. Ergebnisse der Feldversuche im Karosserierohbau bestätigen, dass sich das Auslesen von Offlinekonfigurationen von SPS und Robotern besonders gut zur Automatisierung und zur Skalierung auf ein komplexes Produktionssystem in einem Automobilunternehmen eignet. Die Bewertung der Bestandsdaten im Karosserierohbau hinsichtlich der *Aktualität* und *Vollständigkeit* hat gezeigt, dass die Robotersimulation die meisten Vorteile mit sich bringt. Darauf aufbauend ist es im dritten Baustein der Methodik möglich, die Methode zur automatischen Generierung eines Mengengerüsts der Ressourcen anzuwenden. Das Mengengerüst der Ressourcen besteht aus einer Anlagenstruktur und allen relevanten Ressourcen des Produktionssystems. Aktuelle Informationen zu Anlagenkomponenten aus der Produktionsanlage werden mithilfe von Prozessinformationen zunächst um mechanische Anlagenkomponenten vervollständigt. Bei der Generierung kommt ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Konzept zur Identifikation aktueller Bestandsdaten sowie ein regelbasierter Ansatz zur Vervollständigung zusammengehörender elektrischer und mechanischer Anlagenkomponenten zum Einsatz. Anschließend erfolgt die Verknüpfung der Anlagenkomponenten mit einer Planungsbibliothek, woraus sich die Ressourcen des Produktionssystems ergeben. Zusätzlich werden diese in eine hierarchisch angeordnete Anlagenstruktur eingeführt. Das Resultat ist ein aktuelles Mengengerüst der Ressourcen. Dies ist nach den Umfrageergebnissen die bedeutendste Information bei der Integrationsplanung. Zusätzlich sind jedoch weitere Prozess- und Produktinformationen zum Produktionssystem für die Integrationsplanung relevant. Hierfür findet eine Erweiterung des Mengengerüsts der Ressourcen um

Prozess- und Produktdaten statt. Innerhalb dieser Erweiterung ist bereits die patentierte Methode zur automatischen Generierung einer Stationsabfolge entstanden. Die Informationen zu den Fahrzeugmodellen und –varianten, die von einem Roboter bearbeitet werden, lassen sich direkt aus aktuellen Anlageninformationen generieren. Zur Gewinnung relevanter Fügepunktinformationen und zum Zusammenbau der Fahrzeugteile in einer Station ist die Kombination aktueller Fügepunktinformationen aus der Produktion mit Fügepunktinformationen aus der Fahrzeugkonstruktion notwendig. Die Bereitstellung dieser Informationen für den Planer als Anwender erfolgt durch den Digitalen Zwilling. In der Abhandlung wird zudem aufgezeigt, dass die Umsetzung der entwickelten Methodik durch einen Softwaredemonstrator realisierbar ist (Verifikation). Dies belegt die in drei Szenarien unterteilte Validierung und Evaluierung der Methodik anhand des konzipierten Softwaredemonstrators. Zur Evaluierung eignet sich gemäß dem Forschungsansatz „Design Science Research“ besonders eine Fallstudie. Die Fallstudie wird am Beispiel einer Z1-Linie eines Karosserierohbaus durchgeführt. Diese Z1-Linie umfasst fünf Produktionsanlagen mit über 150 Robotern und mehr als 1500 Anlagenkomponenten und ist somit ein zweckdienliches Praxisbeispiel für ein komplexes Produktionssystem. In der Fallstudie werden drei unterschiedliche Szenarien behandelt. Das *erste Szenario* belegt die Validierung der relevanten Informationen hinsichtlich deren *Vollständigkeit*. Die Validierung des Mengengerüsts der Ressourcen weist eine vollständige Erzeugung der Anlagenstruktur sowie eine nahezu vollständige Erzeugung der Ressourcen in der Produktionsanlage (zu 97,7 Prozent validiert) nach. Ein geringer Prozentsatz war wegen eingeschränktem Zugang im Karosserierohbau nicht kontrollierbar. Die Stationsabfolge sowie die Informationen der Fahrzeugmodelle, Fügepunkte und des Zusammenbaus der Fahrzeugteile in einzelnen Stationen konnten komplett validiert werden und stimmt vollständig mit den Gegebenheiten der Z1-Linie überein. Das *zweite Szenario* zeigt die Verbesserung der Datenqualität gegenüber dem aktuellen Planungsstand zum Produktionssystem auf. Die Validierung ergab für die Informationen zur Stationsabfolge, zum Fahrzeugmodell, zu den Fügepunkten und zum Zusammenbau der Fahrzeugteile eine Verbesserung um 100 Prozent. Quantitativ betrachtet war eine Steigerung der Datenqualität hinsichtlich Anlagenstruktur zwischen 18 bis 60 Prozent je nach Produktionsanlage möglich. In Bezug auf die Anzahl von Robotern wurde eine Verbesserung der Datenqualität je nach Produktionsanlage zwischen 4 bis 131 Prozent erreicht. Quantitativ war zusätzlich eine Verbesserung der Datenqualität einzelner Fertigungsverfahren möglich. Qualitativ betrachtet war eine noch deutlichere Steigerung der Datenqualität erreichbar. So konnte die Datenqualität hinsichtlich der Struktur um durchschnittlich 36 Prozent und bezüglich Ressourcen um

durchschnittlich 65 Prozent gesteigert werden. In Summe war eine deutliche Steigerung der Datenqualität sowohl quantitativ als auch qualitative durch die entwickelte Methodik nachweisbar. Das *dritte Szenario* demonstriert die Ermittlung unterschiedlicher Datenstände im Anlagenlebenszyklus der Z1-Linie und die transparente Darstellung von Änderungen durch den Digitalen Zwilling. Die von der Methodik identifizierten Änderungen konnten ebenfalls durch Instandhalter der Z1-Linie bestätigt werden. Die Anwendbarkeit und Skalierung der Methodik war zum einen durch die Änderungen innerhalb des Anlagenlebenszyklus der Z1-Linie und zum anderen durch deren Umfang von fünf Produktionsanlagen dargelegt. Das Szenario manifestiert die transparente Darstellung eines komplexen Systems wie dem Karosserierohbau durch die entwickelte Methodik. Somit liefert die Methodik einen essenziellen Beitrag im Reifegradindex für Digitalisierung, indem hier die nächste Stufe hin zur „intelligenten Automatisierung basierend auf dem Digitalen Zwilling“ erreicht wurde. Die **Methodik eines Digitalen Zwillings zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung im Karosserierohbau** löst das Problem der unzureichenden Datenqualität bei der Integrationsplanung durch einen automatisierten Ansatz und erfüllt die Zielsetzung. Der wesentliche Beitrag dieser Abhandlung wird im Folgenden in acht Punkten zusammenfasst:

- Die Spezifikation eines Digitalen Zwillings für die Integrationsplanung, der eine automatisierte Erstellung des „Mengengerüst der Ressourcen“, der Stationsabfolge, Informationen zu den Fahrzeugmodellen, Fügepunkten sowie zum Zusammenbau der Fahrzeugteile umfasst.
- Eine Methode zur automatischen Erzeugung eines aktuellen und vollständigen Mengengerüsts der Ressourcen;
- eine automatisierte Generierung einer Stationsabfolge (patentiert);
- ein Ansatz zur Identifikation von Änderungen innerhalb des Karosserierohbaus;
- eine qualitative Verbesserung der Datenqualität hinsichtlich „Aktualität“ um 36 Prozent bei der Anlagenstruktur, um 65 Prozent bei den Anlagenkomponenten sowie um 100 Prozent bei der Stationsabfolge, den Fahrzeugmodellen, den Fügepunkten sowie den Fahrzeugteilen;
- einen Beitrag zur Transparenz für die Integrationsplanung im Karosserierohbau;
- ein automatisierter Ablauf zur Erzeugung relevanter Informationen;
- die Skalierbarkeit und die Anwendung eines Digitalen Zwillings zur Schaffung von Transparenz im komplexen Karosserierohbau.

Der Schwerpunkt bei der Entwicklung der Methodik des Digitalen Zwillings zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für die Integrationsplanung behandelt in dieser Abhandlung den

automobilen Karosserierohbau. Die Methodik kann innerhalb des Karosserierohbaus auch für weitere Anwender wie beispielsweise den Wertstrommanager zur automatisierten Generierung eines Wertstromdiagramms nützlich sein. Zusätzlich ist die zukünftige Verwendung des Digitalen Zwillings durch einen automatisierten Planungsassistenten denkbar. Erste Ansätze hierfür wurden bereits im Rahmen dieser Dissertation erprobt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die entwickelte Methodik eine deutliche Steigerung der Datenqualität für die Integrationsplanung ermöglicht und damit einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil bei der Fahrzeugintegration mit sich bringt. Gleichzeitig fallen für eine Implementierung der Methodik keine Änderungskosten an der Hardware des Produktionssystems an. Daher belaufen sich die Kosten lediglich auf die Umsetzung der Methodik in einer Softwareanwendung. Auf Basis dieser Grundlage wird allen Automobil-OEMs empfohlen, die entwickelte *Methodik des Digitalen Zwillings zur automatisierten Verbesserung der Datenqualität für Integrationsplanungen im Karosserierohbau* als Serienanwendung zu implementieren. Ebenso ist der Einsatz der Methodik in anderen Industriezweigen (z. B. Elektronikindustrie) möglich, wenn eine ähnlich hohe Automatisierung und eine vergleichbare Zusammensetzung der Anlagenkomponenten wie in einem Karosserierohbau gegeben sind.

Glossar

Aktualität	„Informationen sind aktuell, wenn sie die tatsächliche Eigenschaft des beschriebenen Objektes zeitnah abbilden“ (Rohweder et al. 2018, S. 38).
Anforderung	Zu erfüllendes „Bedürfnis oder Erwartung, das angegeben, allgemein angenommen oder obligatorisch ist“ (ISO 8000-8: 2015, S. 2), um ein definiertes Ziel zu erreichen.
Automobil-Gewerk	Ein Automobilwerk besteht in der Regel aus den Gewerken: Presswerk, Rohbau, Lackiererei und Montage.
Brownfield-Planung	Eine Planung im „Brownfield“ entspricht der Umplanung eines sich schon seit einiger Zeit in Betrieb befindenden Produktionssystems zur Erfüllung neuer Anforderungen.
Daten	„Wieder interpretierbare Darstellung von Informationen in einer formalisierten Weise, die für die Kommunikation, Interpretation oder Verarbeitung geeignet ist“ (ISO 8000-8: 2015, S. 1).
Datenqualität	Die Datenqualität ist ein „Mehrdimensionales Maß für die Eignung von Daten, den an ihre Erfassung/Generierung gebunden Zweck zu erfüllen“ (Würthele 2003).
Digitale Fabrik	„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und der dreidimensionalen Visualisierung –, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden“ (VDI-Richtlinie 4499 b).
Digitaler Zwilling	Ein Digitaler Zwilling ist mindestens die Erstellung einer digitalen Repräsentation eines physischen Objekts oder Prozesses, durch die die vom physischen Objekt bereitgestellten Daten intelligent für eine Anwendung nutzbar gemacht werden.

Effizienz	Eine wichtige Kennzahl zur Bewertung der Effizienz ist die erzielte Wertschöpfung im Produktionssystem, denn sie bezieht die Verluste der Prozesse mit ein (Westkämper und Löffler 2016).
Fügefolge	„Die Fügefolge beschreibt die Reihenfolge, in der die einzelnen Komponenten zu einer Gesamtkarosserie zusammengebaut werden“ (Walla 2015).
Greenfield-Planung	Eine Greenfield-Planung ist eine Neuplanung eines Produktionssystems. Hierbei werden eine Fabrik bzw. ein Produktionssystem auf eine „grüne Wiese“ geplant. Deshalb unterliegt diese nur wenigen Restriktionen.
Information	„Wissen über Objekte, wie z. B. Fakten, Ereignisse, Dinge, Prozesse oder Ideen, einschließlich Konzepten, das in einem bestimmten Kontext eine bestimmte Bedeutung hat“ (ISO 8000-8: 2015, S. 1).
Intelligent	Ein System ist intelligent, wenn es Probleme selbstständig und effizient lösen kann und dabei manuelle Eingriffe auf ein Minimum reduziert. (Mainzer 2016, S. 3), (Westkämper und Löffler 2016).
Komplexität	„Der Begriff <i>Komplexität</i> ‘ kann verwendet werden, um ein System oder Teilsystem mit vielen Teilen zu charakterisieren, bei dem die Teile auf vielfältige Weise miteinander interagieren“ (Baccarini 1996, S. 201–202). Komplexität kann in einer Fertigung in mehreren Ausprägungen auftreten (Weyrich et al. 2017, S. 190).
Mengengerüst der Ressourcen	Ein Mengengerüst der Ressourcen besteht aus einer hierarchisch angeordneten Planungsstruktur, welche die Anlagenstruktur abbildet und den dazugehörigen Ressourcen, die alle relevanten Anlagenkomponenten der Produktionsanlage abdecken.
Methode	Systematische Vorgehensweise zur Gewinnung von Erkenntnissen.
Methodik	Der Begriff „Methodik“ wird oft für Methodenkombinationen verwendet (Lindemann 2009, S. 58).
Parsen	Parsen beschreibt die systematische Analyse einer Datei. Die Datei und deren Syntax werden hierbei nach speziellen Informationen gefiltert, die anschließend aufbereitet werden.

Planung	Eine Planung ist eine „gedankliche Vorwegnahme künftigen Handelns“ (Schneeweiß 1991, S. 1–2) und beschreibt die Erstellung eines Konzeptes mit dessen systematischer Verwirklichung ein Ziel erreicht werden soll.
Produkt	„Ein Produkt bezeichnet einen End- oder Zwischenprodukttyp“ (Schleipen und Drath 2009, S. 1) und ist das Ergebnis einer Produktion.
Produktion	„Die Produktion wird allgemein als ein Transformationsprozess verstanden, welcher dazu dient, Wertschöpfung zu generieren. Dies geschieht [...] mit der Entwicklung von Produkten mittels Fabriken und ihren Ressourcen“ (Westkämper et al. 2013, S. 15).
Prozess	„Ein Prozess stellt [hier] einen Produktionsprozess dar, der Teilprozesse, Prozessparameter und die Prozesskette umfasst. Beispiele sind ein Schweißprozess, ein Transportprozess. In technischer Hinsicht verändern Prozesse Produkte“ (Schleipen und Drath 2009, S. 1).
Relevanz	„Informationen sind relevant, wenn sie für den Anwender notwendige Informationen liefern“ (Rohweder et al. 2018, S. 37).
Ressource	In einer automatisierten Fertigung wie einem Karosserierohbau können Ressourcen wie folgt beschrieben werden. „Eine Ressource ist eine an der Produktion beteiligte Einheit; [Ressourcen] führen Prozesse aus und handhaben Produkte. Beispiele für Ressourcen sind Roboter, Förderer oder Maschinen“ (Schleipen und Drath 2009, S. 1).
Transparenz	Transparenz bedeutet relevante Informationen aktuell und vollständig verfügbar zu machen.
Validierung	„Bestätigung durch die Erbringung eines objektiven Nachweises, dass die [methodisch implizierten Forschungserwartungen und die festgelegten] Anforderungen für einen bestimmten Verwendungszweck oder eine bestimmte Anwendung erfüllt sind“ (ISO 8000-8: 2015, S. 2).
Verifikation	„Bestätigung durch die Erbringung eines objektiven Nachweises, dass die festgelegten Anforderungen erfüllt wurden“ (ISO 8000-8: 2015, S. 2).
Vollständigkeit	„Informationen sind vollständig, wenn sie nicht fehlen und zu den festgelegten Zeitpunkten in den jeweiligen Prozess-Schritten zur

Verfügung stehen. [...] Hier ist es notwendig festzulegen, gegen welche Menge, die Vollständigkeit verprobt wird“ (Rohweder et al. 2018, S. 32).

Literaturverzeichnis

- Albers 2007 Albers, Sönke (2007): Methodik der empirischen Forschung. Wiesbaden: Springer Fachmedien. Online verfügbar unter <http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=747433>.
- Amthor et al. 2011 Karl-Josef, Amthor; Wilhelm, August; Eberhard, Beck; Christian, Brecher; Irina, Böckelmann; Juejing, Feng et al. (2011): Anwendungen für Fertigung, Betrieb, Service und Wartung. In: Werner Schreiber und Peter Zimmermann (Hg.): Virtuelle Techniken im industriellen Umfeld. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 213–274.
- Andelfinger 2017 Andelfinger, Volker P. (2017): Einführung. In: Volker P. Andelfinger und Till Hänisch (Hg.): Industrie 4.0. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 1–8.
- Arntz et al. 2020 Arntz, Melanie; Gregory, Terry; Zierahn, Ulrich (2020): Digitalisierung und die Zukunft der Arbeit. In: *Wirtschaftsdienst* 100 (S1), S. 41–47. DOI: 10.1007/s10273-020-2614-6.
- Ashtari Talkhestani et al. 2017 Ashtari Talkhestani, Behrang; Schlögl, Wolfgang; Weyrich, Michael (2017): Synchronisierung von digitalen Modellen mit realen Fertigungszellen auf Basis einer Ankerpunktmethode am Beispiel der Automobilindustrie. In: *atp edition - Automatisierungstechnische Praxis* (vol. 59), S. 62–69.
- Ashtari Talkhestani et al. 2018a Ashtari Talkhestani, Behrang; Jazdi, Nasser; Schloegl, Wolfgang; Weyrich, Michael (2018a): Consistency check to synchronize the Digital Twin of manufacturing automation based on anchor points. In: *Procedia CIRP* 72, S. 159–164. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.166.
- Ashtari Talkhestani et al. 2018b Ashtari Talkhestani, Behrang; Jazdi, Nasser; Schlögl, Wolfgang; Weyrich, Michael (2018b): A concept in synchronization of virtual production system with real factory based on anchor-point method. In: *Procedia CIRP* 67, S. 13–17. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.168.
- Ashtari Talkhestani et al. 2019 Ashtari Talkhestani, Behrang; Jung, Tobias; Lindemann, Benjamin; Sahlab, Nada; Jazdi, Nasser; Schloegl, Wolfgang; Weyrich, Michael (2019): An architecture of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-Physical Production System. In: *at - Automatisierungstechnik* 67 (9), S. 762–782. DOI: 10.1515/auto-2019-0039.
- Assawaarayakul et al. 2020 Assawaarayakul, Chaiwat; Srisawat, Wasin; Ayuthaya, Smitti Darakorn Na; Wattanasirichaigoon, Somkiat (2020): Integrate Digital Twin to Exist Production System for Industry 4.0, S. 1–5. DOI: 10.1109/TIMES-ICON47539.2019.9024430.
- Baccarini 1996 Baccarini, David (1996): The concept of project complexity—a review. In: *International Journal of Project Management* 14 (4), S. 201–204. DOI: 10.1016/0263-7863(95)00093-3.

-
- Barthelmey et al. 2019 Barthelmey, Andre; Lee, Eunseo; Hana, Ramy; Deuse, Jochen (2019): Dynamic digital twin for predictive maintenance in flexible production systems, S. 4209–4214. DOI: 10.1109/IECON.2019.8927397.
- Bauernhansl et al. 2014 Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten; Vogel-Heuser, Birgit (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Bauernhansl et al. 2016 Bauernhansl, Thomas; Krüger, Jörg; Reinhart, Günther; Schuh, Günther (2016): WGP-Standpunkt Industrie 4.0. In: *WGP - Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik*. Online verfügbar unter https://wgp.de/wp-content/uploads/WGP-Standpunkt_Industrie_4-0.pdf.
- Bauernhansl et al. 2018 Bauernhansl, Thomas; Hartleif, Silke; Felix, Thomas (2018): The Digital Shadow of production – A concept for the effective and efficient information supply in dynamic industrial environments. In: *Procedia CIRP* 72, S. 69–74. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.188.
- Berger et al. 2007 Berger, Ulrich; Kretschmann, Ralf; Aner, Matthias (2007): Development of a holistic guidance system for the NC process chain for benchmarking machining operations. ETFA ; 25 - 28 Sept. 2007, University of Patras, Greece. Piscataway, NJ: IEEE Service Center. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4416742>.
- Berger et al. 2017 Berger, Ulrich; Wächter, Kornelius; Ampatzopoulos, Alexandros; Klabuhn, Janny (2017): Integration of a Knowledge Database and Machine Vision Within a Robot-Based CPS. In: Sabina Jeschke, Christian Brecher, Houbing Song and Danda B. Rawat (Hg.): *Industrial Internet of Things*. Cham: Springer International Publishing (Springer Series in Wireless Technology), S. 231–260.
- Bertagnolli 2018 Bertagnolli, Frank (2018): Produktionsplanung. In: Frank Bertagnolli (Hg.): *Lean Management*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 263–272.
- Bettenhausen und Kowalewski 2013 Bettenhausen, Kurt; Kowalewski, Stefan: Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation. Thesen und Handlungsfelder. In: *VDI / VDE 2013*. Online verfügbar unter https://www.vdi.de/uploads/media/Stellungnahme_Cyber-Physical_Systems.pdf.
- Biesinger et al. 2018a Biesinger, Florian; Meike, Davis; Kraß, Benedikt; Schon, David (2018a): Verfahren zum Ermitteln einer Konfigurationsänderung einer Produktionsanlage von Kraftwagen. Patent angemeldet durch Daimler AG, 70327 Stuttgart, DE am 09.05.2018. Veröffentlichungsnr: DE 10 2017 009 886 A1.
- Biesinger et al. 2018b Biesinger, Florian; Meike, Davis; Kraß, Benedikt; Weyrich, Michael (2018b): A Case Study for a Digital Twin of Body-in-White Production Systems. General Concept for Automated Updating of Planning Projects in the Digital Factory. In: *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, S. 19–26. DOI: 10.1109/ETFA.2018.8502467.
- Biesinger et al. 2018c Biesinger, Florian; Meike, Davis; Kraß, Benedikt; Weyrich, Michael (2018c): Methode zum automatischen Abgleich eines Digitalen Zwillings von Automatisierungskomponenten im Feld und deren digitalen Planungsständen. Am Beispiel der Automobilproduktion im Karosserierohbau. In: *Konferenzband*

- 19. Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik: Baden-Baden, 03. und 04. Juli 2018.

- Biesinger et al. 2019a Biesinger, Florian; Kraß, Benedikt; Weyrich, Michael (2019a): A Survey on the Necessity for a Digital Twin of Production in the Automotive Industry. In: *23rd International Conference on Mechatronics Technology – ICMT 2019*, S. 1–8. DOI: 10.1109/ICMECT.2019.8932144.
- Biesinger et al. 2019b Biesinger, Florian; Meike, Davis; Kraß, Benedikt (2019b): Verfahren zur Gestaltung einer Produktionsanlage, insbesondere zur Optimierung eines Produktionsablaufs einer Produktionsanlage. Patent angemeldet durch Daimler AG, 70327 Stuttgart, DE am 15.07.2019. Veröffentlichungsnr: DE 10 2019 004 923 A1.
- Biesinger et al. 2019c Biesinger, Florian; Meike, Davis; Kraß, Benedikt; Weyrich, Michael (2019c): A digital twin for production planning based on cyber-physical systems: A Case Study for a Cyber-Physical System-Based Creation of a Digital Twin. In: *Procedia CIRP 79 - 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 18-20 July 2018* 79, S. 355–360. DOI: 10.1016/j.procir.2019.02.087.
- Biesinger und Weyrich 2019 Biesinger, Florian; Weyrich, Michael (2019): The Facets of Digital Twins in Production and the Automotive Industry. In: *23rd International Conference on Mechatronics Technology – ICMT 2019*, S. 1–6. DOI: 10.1109/ICMECT.2019.8932101.
- Blecker et al. 2018 Blecker, Thorsten; Wagner, Regina; Stark, Lisa (2018): Fertigungsprozesse und deren Steuerung in Cyber-Physischen Systemen. In: Peter Granig, Erich Hartlieb und Bernhard Heiden (Hg.): *Mit Innovationsmanagement zu Industrie 4.0*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 175–188.
- Block et al. 2018 Block, Christian; Lins, Dominik; Kuhlentötter, Bernd (2018): Approach for a simulation-based and event-driven production planning and control in decentralized manufacturing execution systems. In: *Procedia CIRP* 72, S. 1351–1356. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.204.
- Bök et al. 2020 Bök, Patrick-Benjamin; Noack, Andreas; Müller, Marcel; Behnke, Daniel (2020): Grundlagen für industrielle Anwendungen. In: Patrick-Benjamin Bök, Andreas Noack, Marcel Müller und Daniel Behnke (Hg.): *Computernetze und Internet of Things*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 343–405.
- Bordel et al. 2017 Bordel, Borja; Alcarria, Ramón; Robles, Tomás; Martín, Diego (2017): Cyber-physical systems. Extending pervasive sensing from control theory to the Internet of Things. In: *Pervasive and Mobile Computing* 40, S. 156–184. DOI: 10.1016/j.pmcj.2017.06.011.
- Bracht et al. 2011 Bracht, Uwe; Geckler, Dieter; Wenzel, Sigrid (2011): *Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele*. Berlin u.a.: Springer (VDI-Buch).
- Braun et al. 2021 Braun, Dominik; Biesinger, Florian; Jazdi, Nasser; Weyrich, Michael (2021): A concept for the automated layout generation of an existing production line within the Digital Twin. In: *Procedia CIRP Volume 97*, S. 302-307. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.242

Breckle et al. 2019	Breckle, Theresa; Kiesel, Markus; Kiefer, Jens; Beisheim, Nicolai (2019): The evolving digital factory – new chances for a consistent information flow. In: <i>Procedia CIRP</i> 79, S. 251–256. DOI: 10.1016/j.procir.2019.02.059.
Brenner 2018	Brenner, Jörg (2018): <i>Lean Production. Praktische Umsetzung zur Erhöhung der Wertschöpfung</i> . 3., überarbeitete Auflage. München: Hanser (Praxisreihe Qualität).
Brockmeyer 2010	Brockmeyer, H. (2010): <i>Rechnergestützte Methoden zur frühzeitigen Produktbeeinflussung und Produktabstimmung im Karosseriebau</i> . Dissertation. Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg.
Burger et al. 2017	Burger, Ansgar; Lang, Andreas; Müller, Yannis (2017): Mögliche Veränderungen von System-Architekturen im Bereich der Produktion. In: Volker P. Andelfinger und Till Hänisch (Hg.): <i>Industrie 4.0</i> . Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 57–68.
Burr 2008	Burr, Holger (2008): <i>Informationsmanagement an der Schnittstelle zwischen Entwicklung und Produktionsplanung im Karosseriebau</i> . Universität des Saarlandes, Saarbrücken. Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD.
Canedo 2016	Canedo, Arquimedes (2016): Industrial IoT Lifecycle via Digital Twins. In: <i>Proceedings of the Eleventh IEEE/ACM/IFIP 2016</i> , S. 1–2. DOI: 10.1145/2968456.2974008.
Cupek et al. 2009	Cupek, Rafał; Bregulla, Markus; Huczala, Łukasz (2009): PROFINET I/O Network Analyzer. In: Andrzej Kwiecień, Piotr Gaj und Piotr Stera (Hg.): <i>Computer Networks</i> , Bd. 39. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Communications in Computer and Information Science), S. 242–251.
Cutting-Decelle et al. 2007	Cutting-Decelle, A. F.; Young, R.I.M.; Michel, J. J.; Grangel, R.; Le Cardinal, J.; Bourey, J. P. (2007): ISO 15531 MANDATE: A Product-process-resource based Approach for Managing Modularity in Production Management. In: <i>Concurrent Engineering</i> 15 (2), S. 217–235. DOI: 10.1177/1063293X07079329.
Dietz et al. 2013	Dietz, Thomas; Pott, Andreas; Verl, Alexander (2013): <i>Practice for planning and realization of advanced industrial robot systems</i> .
DIN 8580: 2020-01	DIN 8580: 2020-01, Januar 2020: <i>Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung</i> , zuletzt geprüft am 12.08.2020.
DIN 8593-0: 2003-09	DIN 8593-0: 2003-09, September 2003: <i>Fertigungsverfahren Fügen</i> .
Dinse 2015	Dinse, Jakob Alexander (2015): <i>Quantitative Betriebsmittelbedarfsplanung für die getaktete Fließfertigung</i> . Dissertation. Technischen Universität Berlin, Berlin.
Dombrowski et al. 2017	Dombrowski, Uwe; Stefanak, Tobias; Krenkel, Philipp (2017): Aspekte der Fabrikplanung für die Ausrichtung auf Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. In: Gunther Reinhart (Hg.): <i>Reinhart (Hg.) 2017 – Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik</i> . München: Hanser, S. 169–190.

-
- Dombrowski und Marx 2018 Dombrowski, Uwe; Marx, Sabine (2018): *Klimalng - Planung klimagerechter Fabriken*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Draht 2010 Draht, Rainer (2010): *Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML. Integration von CAEX, PLCopen XML und COLLADA*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch).
- Draht 2012 Draht, Rainer (2012): IEEE 17th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 2012. 17 - 21 Sept. 2012, Kraków, Poland ; [including workshops. Piscataway, NJ: IEEE. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6479732>.
- Dudenhöffer und Dudenhöffer 2017 Dudenhöffer, Ferdinand; Dudenhöffer, Kathrin (2017): *Kapazitätsauslastung als strategisches Produktionsziel in der Automobilproduktion*. In: Ingrid Göpfert, David Braun und Matthias Schulz (Hg.): *Automobillogistik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 237–250.
- Eigner et al. 2017 Eigner, Martin; Koch, Walter; Muggeo, Christian (2017): *Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Eißrich 2019 Eißrich, Rainer (2019): *Data & Services @ Digital Factory*. Daimler EDM CAE Forum 2019. EDM CAE Forum 2019. Daimler AG. Stuttgart, 2019.
- Ferrer et al. 2015 Ferrer, Borja Ramis; Ahmad, Bilal; Lobov, Andrei; Vera, Daniel Alexandre; Lastra, Jose Luis Martinez; Harrison, Robert (2015): *An approach for knowledge-driven product, process and resource mappings for assembly automation*. In: *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) Aug 24-28, 2015, Gothenburg, Sweden*, S. 1104–1109. DOI: 10.1109/CoASE.2015.7294245.
- Fischer und Heintel 2015 Fischer, Kai; Heintel, Markus (2015): *Prüfung einer Konsistenz zwischen Referenzdaten eines Fertigungsobjektes und Daten eines digitalen Zwillings des Fertigungsobjektes*. Angemeldet durch Siemens Aktiengesellschaft, 80333 am 17.09.2015. Veröffentlichungsnr: DE102015217855A1.
- Fischer und Heintel 2016 Fischer, Kai; Heintel, Markus (2016): *Examining a consistency between reference data of a production object and data of a digital twin of the production object* am 27.06.2016. Anmeldenr: 2016WO-EP64785. Veröffentlichungsnr: WO201745789.
- Garrido und Sáez 2019 Garrido, J.; Sáez, J. (2019): *Integration of automatic generated simulation models, machine control projects and management tools to support whole life cycle of industrial digital twins*. In: *IFAC-PapersOnLine* 52 (13), S. 1814–1819. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.465.
- Gehrke 2005 Gehrke, Matthias (2005): *Entwurf mechatronischer Systeme auf Basis von Funktionshierarchien und Systemstrukturen*. Dissertation. Universität Paderborn, Paderborn. Institut für Informatik.
- Gehrmann und Gunnarsson 2020 Gehrmann, Christian; Gunnarsson, Martin (2020): *A Digital Twin Based Industrial Automation and Control System Security Architecture*. In: *IEEE Trans. Ind. Inf.* 16 (1), S. 669–680. DOI: 10.1109/TII.2019.2938885.

-
- Geiberger und Broy 2012 Eva Geiberger, Manfred Broy (2012): agendaCPS. Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN.
- Göpfert 2017 Göpfert, Ingrid; Braun, David; Schulz, Matthias (2017): Automobillistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Grundig 2018 Grundig, Claus-Gerold (2018): Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. 6., neu bearbeitete Auflage. München: Hanser. Online verfügbar unter <http://www.hanser-fachbuch.de/9783446454002>.
- Grünendahl et al. 2017 Grünendahl, Ralf-T.; Steinbacher, Andreas F.; Will, Peter H.L. (2017): Das IT-Gesetz: Compliance in der IT-Sicherheit. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Guiffo Kaigom und Rossmann 2020 Guiffo Kaigom, Eric; Rossmann, Jurgen (2020): Value-Driven Robotic Digital Twins in Cyber-Physical Applications. In: *IEEE Trans. Ind. Inf.*, S. 1. DOI: 10.1109/TII.2020.3011062.
- Günther 2015 Günther, Thomas (2015): Baustellenmanagement im Anlagenbau. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Haag und Anderl 2018 Haag, Sebastian; Anderl, Reiner (2018): Digital twin – Proof of concept. In: *Manufacturing Letters* 15, S. 64–66. DOI: 10.1016/j.mfglet.2018.02.006.
- Haag und Anderl 2019 Haag, Sebastian; Anderl, Reiner (2019): Automated Generation of as-manufactured geometric Representations for Digital Twins using STEP. In: *Procedia CIRP* 84, S. 1082–1087. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.305.
- Hagemann und Stark 2018 Hagemann, Simon; Stark, Rainer (2018): Automated Body-in-White Production System Design. Data-based Generation of Production System Configurations. In: *ICKEA 2018*, S. 192–196. DOI: 10.1145/3233347.3233373.
- Hagemann und Stark 2019 Hagemann, Simon; Sünnetcioglu, Atakan; Stark, Rainer (2019): Hybrid Artificial Intelligence System for the Design of Highly-Automated Production Systems. In: *Procedia Manufacturing* 28, S. 160–166. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.12.026.
- Hagemann und Stark 2020 Hagemann, Simon; Stark, Rainer (2020): An optimal algorithm for the robotic assembly system design problem: An industrial case study. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.08.002.
- Halbmayer 2009 Halbmayer, Ernst (2009): Einführung in die empirischen Methoden der Kultur und Sozialanthropologie. Hg. v. Institut für Kultur- und Sozialanthropologie. Universität Wien. Online verfügbar unter <https://www.researchgate.net/publication/237668987>.
- Hänisch 2017 Hänisch, Till (2017): Grundlagen Industrie 4.0. In: Volker P. Andelfinger und Till Hänisch (Hg.): *Industrie 4.0*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 9–31.
- He und Bai 2020 He, Bin; Bai, Kai-Jian (2020): Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review. In: *Adv. Manuf.* DOI: 10.1007/s40436-020-00302-5.

Helbig et al. 2016	Helbig, Tobias; Erler, Stefan; Westkämper, Engelbert; Hoos, Johannes (2016): Modelling Dependencies to Improve the Cross-domain Collaboration in the Engineering Process of Special Purpose Machinery. In: <i>Procedia CIRP</i> 41, S. 393–398. DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.123.
Helfert 2002	Helfert, Markus (2002): Planung und Messung der Datenqualität in Data-Warehouse-Systemen. Dissertation. Hochschule für Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwissenschaften (HSG), St. Gallen.
Hershey et al 2016	Hershey, John Erik; Wheeler, Frederick Wilson; Nielsen, Matthew Christian; Johnson, Christopher Donald; Dell'anno, Michael Joseph; Joykutti, Jojj (2016): Digital twin of twinned physical system. Angemeldet durch General Electric Company [US] am 31.03.2016. Veröffentlichungsnr: US2017286572.
Hevner 2004	Hevner, Alan; Park, Jinsoo; March, Salvatore; Ram, Sudha (2004): Design Science in Information Systems Research. In: <i>MIS Quarterly</i> 2004 (Vol. 28), S. 75–105.
Hoang et al. 2018	Hoang, Xuan Luu; Fay, Alexander; Marks, Philipp; Weyrich, Michael (2018): Industrial Application of a MDM-Based Approach for Generation and Impact Analysis of Adaptation Options - a Case Study 2018, S. 1244–1247. DOI: 10.1109/ETFA.2018.8502460.
Hoffmann 2018	Hoffmann, Jörg (2018): Informationssystem-Architekturen produzierender Unternehmen bei software-definierten Plattformen. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen.
Huber 2016	Huber, Walter (2016): Industrie 4.0 in der Automobilproduktion. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
Hundertmark 2013	Hundertmark, Heike (2013): Beziehungsmanagement in der Automobilindustrie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
IEC ISO 62264-1	IEC ISO 62264-1, 2013-05: IEC 62264-1: Enterprise-control system integration – Part 1: Models and terminology.
IEEE Xplore 29.01.2020	IEEE Xplore (29.01.2020): IEEE. All. https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp .
ISO 8000-8: 2015	ISO 8000-8, 15.11.2015: Data quality.
Ivanov et al. 2020	Ivanov, Dmitry; Tang, Christopher S.; Dolgui, Alexandre; Battini, Daria; Das, Ajay (2020): Researchers' perspectives on Industry 4.0: multi-disciplinary analysis and opportunities for operations management. In: <i>International Journal of Production Research</i> , S. 1–24. DOI: 10.1080/00207543.2020.1798035.
Jacobi und Landherr 2013	Jacobi, Hans-Friedrich; Landherr, Martin (2013): Bedeutung des Treibers Informations- und Kommunikationstechnik für die Wettbewerbsfähigkeit industrieller Produktion. In: Engelbert Westkämper, Dieter Spath, Carmen Constantinescu und Joachim Lentjes (Hg.): <i>Digitale Produktion</i> . Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 41–44.

-
- Jaensch et al. 2018 Jaensch, Florian; Csiszar, Akos; Scheifele, Christian; Verl, Alexander (2018): Digital Twins of Manufacturing Systems as a Base for Machine Learning. In: *2018 25th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*, S. 1–6. DOI: 10.1109/M2VIP.2018.8600844.
- Jaensch et al. 2019 Jaensch, Florian; Csiszar, Akos; Kienzlen, Annika; Verl, Alexander (2019): Reinforcement Learning of Material Flow Control Logic Using Hardware-in-the-Loop Simulation. In: *2018 First International Conference on Artificial Intelligence for Industries (AI4I) 4*, S. 77–80. DOI: 10.1109/AI4I.2018.8665712.
- Jiang et al. 2020 Jiang, Hongfei; Qu, Ting; Wan, Ming; Tang, Liangru; Huang, George Q. (2020): Digital-twin-based implementation framework of production service system for highly dynamic production logistics operation. In: *IET Collaborative Intelligent Manufacturing 2* (2), S. 74–80. DOI: 10.1049/iet-cim.2019.0065.
- Karim et al. 2018 Karim, Ali; Munz, Melanie; Verl, Alexander (2018): Correlation between the dynamic behavior of a six-axis industrial robot and the milling process. *ISR 2018 : June 20-21, 2018 Messe München, Entrance East, Munich, Germany*. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8470558>.
- Karle 2017 Karle, Anton (2017): *Elektromobilität. Grundlagen und Praxis. 2., aktualisierte Auflage*. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.
- Kellermeier et al. 2018 Kellermeier, Kai; Pieper, Carsten; Flatt, Holger; Wisniewski, Lukasz; Biendarra, Alexander (2018): Performance Evaluierung von PROFINET RT Geräten in einem TSN-basierten Backplane. In: Jürgen Jasperneite und Volker Lohweg (Hg.): *Kommunikation und Bildverarbeitung in der Automation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Technologien für die intelligente Automation), S. 40–53.
- Kiefer 2007 Kiefer, Jens (2007): *Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau*. Dissertation. Universität des Saarlandes, Saarbrücken.
- Kiefer et al. 2017 Kiefer, Jens; Allegretti, Sebastian; Breckle, Theresa (2017): Quality- and Lifecycle-oriented Production Engineering in Automotive Industry. In: *Procedia CIRP* 62, S. 446–451. DOI: 10.1016/j.procir.2016.06.086.
- Kiefer et al. 2018 Kiefer, Jens; Breckle, Theresa; Stetter, Ralf; Manns, Martin (2018): Digital assembly planning using graph-based design languages. In: *Procedia CIRP* 72, S. 802–807. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.063.
- Klostermeier et al. 2019 Klostermeier, Robin; Haag, Steffi; Benlian, Alexander (Hg.) (2019): *Forschungshintergrund*: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Koch 2018 Koch, Christoph (2018). *Wertstromanalyse und -design für Auftragsfertiger*. Dissertation. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg.
- Kritzinger et al. 2018 Kritzinger, Werner; Karner, Matthias; Traar, Georg; Henjes, Jan; Sihn, Wilfried (2018): Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. In: *IFAC Conference Paper Archive* 51 (11), S. 1016–1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

-
- Küber 2017 Küber, Christian (2017): Methode zur Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen in der variantenreichen Serienmontage am Beispiel der Automobilindustrie. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering Universität Stuttgart.
- Kühn 2006 Kühn, Wolfgang (2006): Digitale Fabrik. Fabriksimulation für Produktionsplaner. München: Hanser. Online verfügbar unter http://deposit.dnb.de/cgi-bin/dokserv?id=2713026&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm.
- Kunath und Winkler 2019 Kunath, Martin; Winkler, Herwig (2019): Adaptive Assistenzsysteme zur Entscheidungsunterstützung für die dynamische Auftragsabwicklung: Konzeptionelle Überlegungen und Anwendungsszenarien unter Berücksichtigung des Digitalen Zwillings des Produktionssystems. In: Robert Obermaier (Hg.): Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 269–294.
- Lager 2020 Lager, Hendrik (2020): Anpassungsfähigkeit in Zeiten der Digitalisierung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Lambertz 2009 Lambertz, Arne (2009): Übersicht Rohbauebenenlinien. Technisch-wirtschaftliche Bewertung von Flexibilität in Rohbauebenenlinien. Dissertation. Technischen Universität Berlin, Berlin. Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme.
- Lamnek 2005 Lamnek, Siegfried (2005): Qualitative Sozialforschung. Lehrbuch. 4., vollst. überarb. Aufl., [Nachdr.]. Weinheim: Beltz PVU.
- Landherr et al. 2013 Landherr, Martin; Neumann, Michael; Volkmann, Johannes; Jäger, Jens; Kluth, Andreas; Lucke, Dominik et al. (2013): Fabriklebenszyklusmanagement. In: Engelbert Westkämper, Dieter Spath, Carmen Constantinescu und Joachim Lentes (Hg.): Digitale Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 163–195.
- Lee 2008 Lee, Edward A. (2008): Cyber Physical Systems: Design Challenges. In: *International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, 364-369. DOI: 10.1109/ISORC.2008.25.
- Leskovsky et al. 2020 Leskovsky, Roman; Kucera, Erik; Haffner, Oto; Rosinova, Danica (2020): Proposal of Digital Twin Platform Based on 3D Rendering and IIoT Principles Using Virtual / Augmented Reality, S. 1–8. DOI: 10.1109/KI48306.2020.9039804.
- Li et al. 2020 Li, Mingshi; MA, Yue; YIN, Zhenyu; WANG, Chunxiao (2020): Structural Design of Digital Twin Laboratory Model Based on Instruments Sharing Platform. In: *2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC 2020)*, S. 797–802. DOI: 10.1109/CCDC49329.2020.9164813.
- Lindemann 2009 Lindemann, Udo (2009): Methodische Entwicklung technischer Produkte. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

-
- Lüder und Schmidt 2017 Lüder, Arndt; Schmidt, Nicole (2017): AutomationML in a Nutshell. In: Birgit Vogel-Heuser, Thomas Bauernhansl und Michael ten Hompel (Hg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.2. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 213–258.
- Mainzer 2016 Mainzer, Klaus (2016): Künstliche Intelligenz – Wann übernehmen die Maschinen? Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Marks 2020 Marks, Philipp (2020): Softwaregestütztes Assistenzkonzept zur Modernisierung von Automatisierungssystemen. Dissertation. Universität Stuttgart, Düren. Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme.
- Marks et al.2018 Marks, Philipp; Hoang, Xuan Luu; Weyrich, Michael; Fay, Alexander (2018): A systematic approach for supporting the adaptation process of discrete manufacturing machines. In: Res Eng Design 29 (4), S. 621–641. DOI: 10.1007/s00163-018-0296-5.
- Marks et al. 2017 Marks, Philipp; Weyrich, Michael; Hoang, Xuan Luu; Fay, Alexander (2017): Agent-based Adaptation of automated Manufacturing Machines. In: 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, September 12-15, 2017, Limassol, Cyprus. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8233358>.
- Meyer und Grillitsch 2020 Meyer, Torben; Grillitsch, Ulrich (2020): Virtuelle Inbetriebnahme mittels Ablaufsimulation in der Automobilindustrie. In: Gottfried Mayer, Carsten Pöge, Sven Spieckermann und Sigrid Wenzel (Hg.): Ablaufsimulation in der Automobilindustrie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 275–287.
- Michalos et al. 2015 Michalos, G.; Fysikopoulos, A.; Makris, S.; Mourtzis, D.; Chryssolouris, G. (2015): Multi criteria assembly line design and configuration – An automotive case study. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 9, S. 69–87. DOI: 10.1016/j.cirpj.2015.01.002.
- Michels et al. 2018 Michels, Adalberto Sato; Lopes, Thiago Cantos; Sikora, Celso Gustavo Stall; Magatão, Leandro (2018): The Robotic Assembly Line Design (RALD) problem: Model and case studies with practical extensions. In: Computers & Industrial Engineering 120, S. 320–333. DOI: 10.1016/j.cie.2018.04.010.
- Minguez 2013 Minguez, Jorge (2013): Der Manufacturing Service Bus. In: Engelbert Westkämper, Dieter Spath, Carmen Constantinescu und Joachim Lentjes (Hg.): Digitale Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 271–289.
- Mößmer 2007 Mößmer, H. E.; Schedlbauer, M.; Günthner, W. A. (2007): Die automobile Welt im Umbruch, S. 3–15. DOI: 10.1007/978-3-540-72556-5_1.
- Negri 2017 Negri, Elisa; Fumagalli, Luca; Macchi, Marco (2017): A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. In: *Procedia Manufacturing* 11, S. 939–948. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.198.
- Obermaier 2019 Obermaier, Robert (2019): Industrie 4.0 und Digitale Transformation als unternehmerische Gestaltungsaufgabe. In: Robert Obermaier (Hg.): Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 3–46.

-
- Osterwinter 1992 Osterwinter, Meinolf (1992): Steuerungsorientierte Robotersimulation. DOI: 10.1007/978-3-322-87812-0.
- Pawellek 2014 Pawellek, Günther (2014): Ganzheitliche Fabrikplanung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Pfrommer et al. 2013 Pfrommer, Julius; Schleipen, Miriam; Beyerer, Jurgen (2013): PPRS: Production skills and their relation to product, process, and resource. In: *IEEE*, S. 1–4. DOI: 10.1109/ETFA.2013.6648114.
- Prawitz 2020 Prawitz, Sven (2020): Ineos hat Interesse an Daimler-Werk Hambach. In: *Automobil-Industrie* 2020, 08.07.2020 (Wirtschaft). Online verfügbar unter <https://www.automobil-industrie.vogel.de/ineos-hat-interesse-an-daimler-werk-hambach-a-947044/>.
- Preuveneers et al. 2018 Preuveneers, Davy; Joosen, Wouter; Ilie-Zudor, Elisabeth (2018): Robust Digital Twin Compositions for Industry 4.0 Smart Manufacturing Systems. In: *IEEE computer society*, S. 69–78. DOI: 10.1109/EDOCW.2018.00021.
- Raj und Surianarayanan 2019 Raj, Pethuru; Surianarayanan, Chellammal (2019): Digital twin: The industry use cases 117, S. 285–320. DOI: 10.1016/bs.adcom.2019.09.006.
- Raza et al. 2018 Raza, Mohsin; Kumar, Priyan Malarvizhi; Hung, Dang Viet; Davis, William; Nguyen, Huan; Trestian, Ramona (2018): A Digital Twin Framework for Industry 4.0 Enabling Next-Gen Manufacturing 6, S. 73–77. DOI: 10.1109/ICITM48982.2020.9080395.
- Rentschler und Drath 2018 Rentschler, Markus; Drath, Rainer (2018): Vendor-Independent modeling and exchange of Fieldbus Topologies with AutomationML. In: *IEEE ETFA*, S. 956–963. DOI: 10.1109/ETFA.2018.8502630.
- Riedel et al. 2020 Riedel, Oliver; Verl, Alexander; Kübler, Karl; Jaensch, Florian; Deuse, Jochen; Richter, Ralph et al. (2020): Leitfaden Virtuelle Inbetriebnahme. Handlungsempfehlungen zum wirtschaftlichen Einstieg. VDMA Verlag GmbH. VDMA.
- Rohweder et al. 2018 Rohweder, Jan P.; Kasten, Gerhard; Malzahn, Dirk; Piro, Andrea; Schmid, Joachim (Hg.) (2018): Informationsqualität – Definitionen, Dimensionen und Begriffe. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Rosen et al. 2015 Rosen, Roland; Wichert, Georg von; Lo, George; Bettenhausen, Kurt D. (2015): About the Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. In: *IFAC-PapersOnLine* 48 (3), S. 567–572. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141.
- Santillan Martinez et al. 2018a Santillan Martinez, Gerardo; Sierla, Seppo; Karhela, Tommi; Vyatkin, Valeriy (2018a): Automatic Generation of a Simulation-Based Digital Twin of an Industrial Process Plant, S. 3084–3089. DOI: 10.1109/IECON.2018.8591464.
- Santillan Martinez et al. 2018b Santillan Martinez, Gerardo; Sierla, Seppo A.; Karhela, Tommi A.; Lappalainen, Jari; Vyatkin, Valeriy (2018b): Automatic Generation of a High-Fidelity Dynamic Thermal-Hydraulic Process Simulation Model From a 3D Plant Model. In: *IEEE Access* 6, S. 45217–45232. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2865206.

-
- Schack 2008 Schack, Rainer (2008): Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2007. München: Utz (Forschungsberichte / IWB, Bd. 207).
- Schel et al. 2018 Schel, Daniel; Henkel, Christian; Stock, Daniel; Meyer, Olga; Rauhöft, Greg; Einberger, Peter et al. (2018): Manufacturing Service Bus. An Implementation. In: *Procedia CIRP* 67, S. 179–184. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.196.
- Scheplitz et al. 2020 Scheplitz, Tim; Benedict, Martin; Schlieter, Hannes; Kaczmarek, Stefanie; Susky, Marcel (2020): Forschung in Digitalen Innovationsprojekten – zwischen Praxistauglichkeit und wissenschaftlicher Relevanz. In: *HMD* 57 (2), S. 257–273. DOI: 10.1365/s40702-020-00601-2.
- Schindler 2019 Schindler, Matthias (2019): System und Methode zur Planung von Produktionssystemen auf Basis der 3D-Digitalisierung bestehender Strukturen mit Farbinformation. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW).
- Schleich et al. 2017 Schleich, Benjamin; Anwer, Nabil; Mathieu, Luc; Wartzack, Sandro (2017): Shaping the digital twin for design and production engineering. In: *CIRP Annals* 66 (1), S. 141–144. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.040.
- Schleipen und Drath 2009 Schleipen, Miriam; Drath, Rainer (2009): Three-view-concept for modeling process or manufacturing plants with AutomationML, S. 1–4. DOI: 10.1109/ETFA.2009.5347260.
- Schluse et al. 2017 Schluse, Michael; Atorf, Linus; Rossmann, Juergen (2017): Experimentable digital twins for model-based systems engineering and simulation-based development (2017 Annual IEEE International Systems), S. 1–8. DOI: 10.1109/SYSCON.2017.7934796.
- Schluse et al. 2018 Schluse, Michael; Priggemeyer, Marc; Atorf, Linus; Rossmann, Juergen (2018): Experimentable Digital Twins—Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0. In: *IEEE Trans. Ind. Inf.* 14 (4), S. 1722–1731. DOI: 10.1109/TII.2018.2804917.
- Schluse und Rossmann2016 Schluse, Michael; Rossmann, Juergen (2016): From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems. In: *IEEE*, S. 1–6. DOI: 10.1109/SysEng.2016.7753162.
- Schmidt et al. 2014 Schmidt, Nicole; Luder, Arndt; Steininger, Heinrich; Biffi, Stefan (2014): Analyzing requirements on software tools according to the functional engineering phase in the technical systems engineering process. In: *IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA) 2014*, S. 1–8. DOI: 10.1109/ETFA.2014.7005144.
- Schneeweiß 1991 Schneeweiß, Christoph (1991): Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen. Berlin: Springer (Springer-Lehrbuch, / Christoph Schneeweiß ; 1).
- Schneider 2011 Schneider, Kathrin (2011): Modernes Sourcing in der Automobilindustrie. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2010. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden (Informationsmanagement

-
- und Computer Aided Team). Online verfügbar unter <http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=751301>.
- Schroeder et al. 2016 Schroeder, Greyce N.; Steinmetz, Charles; Pereira, Carlos E.; Espindola, Danubia B. (2016): Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange. In: *IFAC-PapersOnLine* 49 (30), S. 12–17. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.11.115.
- Schuh et al. 2016 Schuh, Günther; Walendzik, Pia; Luckert, Melanie; Birkmaier, Martin; Weber, Anja; Blum, Matthias; (Keine Angabe) (2016): Keine Industrie 4.0 ohne den Digitalen Schatten. Wie Unternehmen die notwendige Datenbasis schaffen 111 (11), S. 745–748. Online verfügbar unter www.zwf-online.de.
- Schuh et al. 2017 Schuh, Günther; Potente, Till; Reuter, Christina; Hauptvogel, Annika (2017): Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch cyber-physische Systeme. In: Birgit Vogel-Heuser, Thomas Bauernhansl und Michael ten Hompel (Hg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd.2*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 75–92.
- Shafto et al. 2010 Shafto, Mike; Conroy, Mike; Doyle, Rich; Glaessgen, Ed; Kemp, Chris; LeMoigne, Jacqueline; Wang, Lui (2010): NASA Modeling, Simulation, Information Technology & Processing - TA11. In: *National Aeronautics and Space Administration*.
- Silcher 2014 Silcher, Stefan (2014): Adaptive und wandlungsfähige IT-Architektur für Produktionsunternehmen. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Parallele und Verteilte Systeme.
- Stanev 2012 Stanev, Stilian (2012): Methodik zur produktionsorientierten Produktanalyse für die Wiederverwendung von Produktionssystemen – 2REUSE. Konzept, Informationsmodell und Validierung am besonderen Beispiel des Karosserierohbaus in der Automobilindustrie. Dissertation. Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Karlsruhe, zuletzt geprüft am 16.03.2012.
- Stich 2007 Stich, Christoph (2007): *Produktionsplanung in der Automobilindustrie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Stuttgarter Zeitung 07.08.2020 Stuttgarter Zeitung (07.08.2020): Daimler hat ein umfangreiches Sparprogramm. Stuttgart, Stuttgarter Zeitung Verlagsgesellschaft mbH. Online verfügbar unter www.stuttgarter-zeitung.de, zuletzt geprüft am 18.08.2020.
- Tau und Zhang 2017 Tao, Fei; Zhang, Meng (2017): Digital Twin Shop-Floor. A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. In: *IEEE Access* 5, S. 20418–20427. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2756069.
- Thommen et al. 2017 Thommen, Jean-Paul; Achleitner, Ann-Kristin; Gilbert, Dirk Ulrich; Hachmeister, Dirk; Kaiser, Gernot (2017): *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Uhlemann et al. 2017a Uhlemann, Thomas H.-J.; Lehmann, Christian; Steinhilper, Rolf (2017a): The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. In: *Procedia CIRP* 61, S. 335–340. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.152.

-
- Uhlemann et al. 2017b Uhlemann, Thomas H.-J.; Schock, Christoph; Lehmann, Christian; Freiberger, Stefan; Steinhilper, Rolf (2017b): The Digital Twin: Demonstrating the Potential of Real Time Data Acquisition in Production Systems. In: *Procedia Manufacturing* 9, S. 113–120. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.04.043.
- Um et al. 2017 Um, Jumyung; Weyer, Stephan; Quint, Fabian (2017): Plug-and-Simulate within Modular Assembly Line enabled by Digital Twins and the use of AutomationML. In: *IFAC-PapersOnLine* 50 (1), S. 15904–15909. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.2360.
- Vaishnavi et al. 2019 Vaishnavi, Vijay; Kuechler, Bill; Petter, Stacie (2019): Design Science Research in Information Systems. erstellt 2004. Online verfügbar unter <http://www.desrist.org/design-research-in-information-systems/>, zuletzt aktualisiert am 30.06.2019, zuletzt geprüft am 11.08.2020.
- VDI/VDE-Richtlinie 3714 VDI/VDE-Richtlinie 3714, Dezember 2019: Implementierung und Betrieb von Big-Data-Anwendungen in der produzierenden Industrie Datenqualität.
- VDI-Richtlinie 2861 VDI-Richtlinie 2861, Mai 1988: Montage- und Handhabungstechnik, zuletzt geprüft am 12.08.2020.
- VDI-Richtlinie 4499 VDI-Richtlinie 4499, April 2016: Digitale Fabrik Datenmanagement und Systemarchitekturen.
- VDI-Richtlinie 4499 b VDI-Richtlinie 4499, Februar 2008: Digitale Fabrik Grundlagen.
- Verl et al. 2012 Verl, Alexander; Lechler, Armin; Schlechtendahl, Jan (2012): Globalized cyber physical production systems. In: *Prod. Eng. Res. Devel.* 6 (6), S. 643–649. DOI: 10.1007/s11740-012-0418-2.
- Verl et al. 2013 Verl, Alexander; Lechler, Armin; Wesner, Stefan; Kirstädter, Andreas; Schlechtendahl, Jan; Schubert, Lutz; Meier, Sebastian (2013): An Approach for a Cloud-based Machine Tool Control. In: *Procedia CIRP* 7, S. 682–687. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.053.
- Verl et al. 2019 Verl, Alexander; Valente, Anna; Melkote, Shreyes; Brecher, Christian; Ozturk, Erdem; Tunc, Lutfi Taner (2019): Robots in machining. In: *CIRP Annals* 68 (2), S. 799–822. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.05.009.
- Verl und Kienzlen 2019 Verl, Alexander; Kienzlen, Annika (2019): Der Materialfluss des digitalen Zwillings. In: *SPS Magazin* (10), S. 34–36. Online verfügbar unter https://d.sps-magazin.de/?inc=artikel/article_show&nr=167946.
- Vogel-Heuser 2017 Vogel-Heuser, Birgit (2017): Herausforderungen und Anforderungen aus Sicht der IT und der Automatisierungstechnik. In: Birgit Vogel-Heuser, Thomas Bauernhansl und Michael ten Hompel (Hg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 33–44.
- Vogel-Heuser et al. 2015 Vogel-Heuser, Birgit; Fay, Alexander; Schaefer, Ina; Tichy, Matthias (2015): Evolution of software in automated production systems: Challenges and research directions. In: *Journal of Systems and Software* 110, S. 54–84. DOI: 10.1016/j.jss.2015.08.026.

-
- Vogelpohl et al. 2013 Vogelpohl, Jens; Woithe, Alexander; Weyer, David; Class, Philip (2013): Systemabsicherung in der Karosserieentwicklung. In: *ATZ Automobiltech Z* 115 (7-8), S. 578–583. DOI: 10.1007/s35148-013-0214-0.
- vom Brocke und Maedche 2019 vom Brocke, Jan; Maedche, Alexander (2019): The DSR grid: six core dimensions for effectively planning and communicating design science research projects. In: *Electron Markets* 29 (3), S. 379–385. DOI: 10.1007/s12525-019-00358-7.
- Vyatkin 2013 Vyatkin, Valeriy (2013): Software Engineering in Industrial Automation: State-of-the-Art Review. In: *IEEE Trans. Ind. Inf.* 9 (3), S. 1234–1249. DOI: 10.1109/TII.2013.2258165.
- Wagner 2017 Wagner, Constantin; Grothoff, Julian; Epple, Ulrich; Drath, Rainer; Malakuti, Somayah; Gruner, Sten et al. (2017): The role of the Industry 4.0 asset administration shell and the digital twin during the life cycle of a plant. September 12-15, 2017, Limassol, Cyprus, S. 1–8. DOI: 10.1109/ETFA.2017.8247583.
- Wagner 2019 Wagner, Raphael; Schleich, Benjamin; Haefner, Benjamin; Kuhnle, Andreas; Wartzack, Sandro; Lanza, Gisela (2019): Challenges and Potentials of Digital Twins and Industry 4.0 in Product Design and Production for High Performance Products. In: *Procedia CIRP* 84, S. 88–93. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.219.
- Walla und Kiefer 2011 Walla, Waldemar; Kiefer, Jens (2011): Life Cycle Engineering – Integration of New Products on Existing Production Systems in Automotive Industry. In: Jürgen Hesselbach und Christoph Herrmann (Hg.): *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 207–212.
- Walla 2015 Walla, Waldemar (2015): Standard- und Modulbasierte digitale Rohbauprozesskette. Frühzeitige Produktbeeinflussung bezüglich Produktionsanforderungen im Karosserierohbau der Automobilindustrie. Dissertation. Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Karlsruhe, zuletzt geprüft am 04.12.2015.
- Wallmüller 2017 Wallmüller, Ernest (2017): *Praxiswissen Digitale Transformation. Den Wandel verstehen, Lösungen entwickeln, Wertschöpfung steigern*. München: Hanser.
- Wand und Wang 1996 Wand, Yair; Wang, Richard (1996): Anchoring Data Quality Dimensions in Ontological Foundations. Hg. v. *Communications of the ACM (CACM)*. Online verfügbar unter <http://web.mit.edu/tdqm/www/papers/94/94-03.html>, zuletzt aktualisiert am 30.09.1996, zuletzt geprüft am 31.05.2019.
- Wang und Strong 1996 Wang, Richard; Strong, Diane (1996): Beyond Accuracy: What Data Quality Means to Data Consumers. In: *Journal of Management Information Systems*, Vol. 12, No. 4 (Spring, 1996), pp. 5-33 1996.
- Wegener 2019 Wegener, Dieter (2019): Industrie 4.0 – wie die Digitalisierung die Produktionskette revolutioniert. In: Robert Obermaier (Hg.): *Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 73–89.

Welt 16.08.2020	Welt (16.08.2020): 1135 Euro Verlust pro Wagen - dieser deutsche Autobauer muss dringend handeln, WeltN24 GmbH. Online verfügbar unter GBI-Genios Deutsche Wirtschaftsdatenbank GmbH, zuletzt geprüft am 18.08.2020.
Wemhöner 2005	Wemhöner, Nils (2005): Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau. Dissertation. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Institut Produktionstechnologie.
Westkämper et al. 2013	Westkämper, Engelbert; Spath, Dieter; Constantinescu, Carmen; Lentjes, Joachim (2013): Digitale Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
Westkämper und Löffler 2016	Westkämper, Engelbert; Löffler, Carina (2016): Strategien der Produktion. Technologien, Konzepte und Wege in die Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer.
Weyrich 2018a	Weyrich, Michael (2018a): On the Application of cyber physical Production Systems. How a digital twin of physical Systems can be created, updated and utilised in manufacturing automation. In: III International Conference Computer Algebra and Information Technologies CAIT-Odessa-2018, 20.-25. August 2018, Odessa, Ukraine.
Weyrich 2018b	Weyrich, Michael (2018b): Towards future Automation Systems in Manufacturing. In: International Conference SIMULATION 2018, 12.-14. September 2018, Kiev, Ukraine.
Weyrich 2019	Weyrich, Michael (2019): Towards Digital Twins for intelligent Automation. Siemens Simulation and Digital Twin Conference. Siemens AG. München, 19.11.2019.
Weyrich et al. 2014	Weyrich, Michael; Klein, Philipp; Steden, Frank (2014): Reuse of modules for mechatronic modeling and evaluation of manufacturing systems in the conceptual design and basic engineering phase. In: <i>IFAC Proceedings Volumes</i> 47 (3), S. 3450–3455. DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.00409.
Weyrich et al. 2017	Weyrich, Michael; Klein, Matthias; Schmidt, Jan-Philipp; Jazdi, Nasser; Bettenhausen, Kurt D.; Buschmann, Frank et al. (2017): Evaluation Model for Assessment of Cyber-Physical Production Systems. In: Sabina Jeschke, Christian Brecher, Houbing Song und Danda B. Rawat (Hg.): <i>Industrial Internet of Things</i> . Cham: Springer International Publishing (Springer Series in Wireless Technology), S. 169–199.
Wibbe und Rohde 2017	Wibbe, Christian; Rohde, Dirk (2017): <i>Industrie 4.0 im automobilen Umfeld</i> . In: Ingrid Göpfert, David Braun und Matthias Schulz (Hg.): <i>Automobillogistik</i> . Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 37–52.
Wiendahl et al. 2014	Wiendahl, Hans-Peter; Reichardt, Jürgen; Nyhuis, Peter (2014): <i>Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten</i> . 2., überarb. und erw. Aufl., [elektronische Ressource]. München: Hanser. Online verfügbar unter http://www.hanser-elibrary.com/action/showBook?doi=10.3139/9783446437029 .
Wittek 2013	Wittek, Kai (2013): <i>Standortübergreifende Programmplanung in flexiblen Produktionsnetzwerken der Automobilindustrie</i> . Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Würthele 2003	Würthele, Volker Gerhard (2003): Datenqualitätsmetrik für Informationsprozesse: Datenqualitätsmanagement mittels ganzheitlicher Messung der Datenqualität. Dissertation. ETH Zürich, Zürich.
Zeller 2019	Zeller, Andreas (2019): Absicherung von verteilten Automatisierungssystemen nach Änderungen der Steuerungssoftware. Modellkomposition zur Nutzung der funktionalen Verifikation. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme.
Zipper et al. 2018	Zipper, Holger; Auris, Felix; Strahilov, Anton; Paul, Manuel (2018): Keeping the digital twin up-to-date — Process monitoring to identify changes in a plant. In: <i>2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)</i> , S. 1592–1597. DOI: 10.1109/ICIT.2018.8352419.
Zipper und Diedrich 2019	Zipper, Holger; Diedrich, Christian (2019): Synchronization of Industrial Plant and Digital Twin. In: <i>2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)</i> , S. 1678–1681. DOI: 10.1109/ETFA.2019.8868994.

Anhang

Anhangsverzeichnis Abbildungen

Abbildung A 1: Auswertung Abweichungen Planungsprojekt - Fertigungsverfahren 3	141
Abbildung A 2: Auswertung Abweichungen Planungsprojekt - Handhabungsgeräte	141
Abbildung A 3: Auswertung Abweichungen Planungsprojekt - SPS-Bereiche	142
Abbildung A 4: Auswertung Ressourcen Planungsprojekt Produktionsanlage 1	143
Abbildung A 5: Auswertung Ressourcen Planungsprojekt Produktionsanlage 3	143
Abbildung A 6: Auswertung Ressourcen Planungsprojekt Produktionsanlage 4	143
Abbildung A 7: Auswertung Ressourcen Planungsprojekt Produktionsanlage 5	144
Abbildung A 8: Frontend Digitaler Zwilling	145
Abbildung A 9: Mengengerüst der Ressourcen und Stationsabfolge in AML	146
Abbildung A 10: Datenimport in den "DELMIA" Process Engineer	147

Anhangsverzeichnis Tabellen

Tabelle A 1: Auswertung der Anlagenstruktur Produktionsanlage 1	134
Tabelle A 2: Auswertung der Anlagenstruktur Produktionsanlage 2	135
Tabelle A 3: Auswertung der Anlagenstruktur Produktionsanlage 3	135
Tabelle A 4: Auswertung der Anlagenstruktur Produktionsanlage 4	136
Tabelle A 5: Auswertung der Anlagenstruktur Produktionsanlage 5	137
Tabelle A 6: Qualitative und quantitative Auswertung der Fertigungstechnologien, der Roboter und der Fertigungsstruktur	137
Tabelle A 7: Auswertung der ausgelesenen Fügepunkte in der Produktion	138
Tabelle A 8: Auswertung Fahrzeugteile mit entsprechenden Fügepunkten	139
Tabelle A 9: Quantitative Auswertung der Aktualität "veralteter" Datenstand Ressourcen	140
Tabelle A 10: Quantitative Auswertung der Aktualität "veralteter" Datenstand Struktur	142

Tabelle A 1: Auswertung der Anlagenstruktur Produktionsanlage 1

Produktionsanlage	SPS Bereich	Station	Digitaler Zwilling	reale Anlage	Planungsstand
Produktionsanlage 1	SPS 1	010	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 1	SPS 1	012	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 1	SPS 1	015	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 1	SPS 1	020	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 1	SPS 1	030	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 1	SPS 2	040	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 1	SPS 2	048	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 1	SPS 2	050	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 1	SPS 2	052	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 1	SPS 2	060	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 1	SPS 2	070	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 1	SPS 2	080	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 1	SPS 3	085	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 1	SPS 3	090	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 1	SPS 3	098	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 1	SPS 3	100	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 1	SPS 3	102	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 1	SPS 3	105	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 1	SPS 3	110	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 1	SPS 3	120	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 1	SPS 3	130	Ja	Ja	Ja
Planungsprojekt		75	Nein	Nein	Ja

Tabelle A 2: Auswertung der Anlagenstruktur Produktionsanlage 2

Produktionsanlage	SPS Bereich	Station	Digitaler Zwilling	reale Anlage	Planungsstand
Produktionsanlage 2	SPS 1	010	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 2	SPS 1	020	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 2	SPS 1	030	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 2	SPS 2	040	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 2	SPS 2	050	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 2	SPS 2	060	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 2	SPS 2	070	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 2	SPS 2	080	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 2	SPS 3	090	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 2	SPS 3	100	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 2	SPS 3	110	Ja	Ja	Nein

Tabelle A 3: Auswertung der Anlagenstruktur Produktionsanlage 3

Produktionsanlage	SPS Bereich	Station	Digitaler Zwilling	reale Anlage	Planungsstand
Produktionsanlage 3	SPS 1	010	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 3	SPS 1	020	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 3	SPS 1	030	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 3	SPS 1	040	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 3	SPS 1	050	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 3	SPS 2	060	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 3	SPS 2	070	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 3	SPS 2	080	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 3	SPS 2	090	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 3	SPS 2	100	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 3	SPS 3	110	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 3	SPS 3	120	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 3	SPS 4	125	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 3	SPS 3	130	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 3	SPS 3	140	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 3		95	Nein	Nein	Ja

Tabelle A 4: Auswertung der Anlagenstruktur Produktionsanlage 4

Produktionsanlage	SPS Bereich	Station	Digitaler Zwilling	reale Anlage	Planungsstand
Produktionsanlage 4	SPS 1	010	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 4	SPS 1	020	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 4	SPS 1	030	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 4	SPS 1	040	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 4	SPS 2	050	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 4	SPS 2	060	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 4	SPS 2	070	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 4	SPS 2	080	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 4	SPS 2	090	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 4	SPS 3	110	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 4	SPS 3	120	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 4	SPS 4	130	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 4	SPS 4	140	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 4	SPS 5	150	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 4	SPS 5	160	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 4	SPS 5	170	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 4	SPS 5	175	Ja	Ja	Nein

Tabelle A 5: Auswertung der Anlagenstruktur Produktionsanlage 5

Produktionsanlage	SPS Bereich	Station	erzeugt durch Digitaler Zwilling	reale Anlage	Planungsstand
Produktionsanlage 5	SPS 1	010	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 5	SPS 1	020	Ja	Ja	Nein
Produktionsanlage 5	SPS 1	030	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 5	SPS 1	040	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 5	SPS 2	050	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 5	SPS 2	060	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 5	SPS 2	070	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 5	SPS 2	080	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 5	SPS 2	090	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 5	SPS 2	100	Ja	Ja	Ja
Produktionsanlage 5		110	Nein	Nein	Ja
Produktionsanlage 5		120	Nein	Nein	Ja
Produktionsanlage 5		130	Nein	Nein	Ja
Produktionsanlage 5		135	Nein	Nein	Ja
Produktionsanlage 5		140	Nein	Nein	Ja
Produktionsanlage 5		150	Nein	Nein	Ja
Produktionsanlage 5		160	Nein	Nein	Ja

Tabelle A 6: Qualitative und quantitative Auswertung der Fertigungstechnologien, der Roboter und der Fertigungsstruktur

	Real	Szenario 1 - a	Szenario 1 - b	Szenario 1 - c	Szenario 1 - d	Szenario 1 - e	Szenario 1 - f	Szenario 1 - g	Szenario 1 - h
Roboter	163	identifiziert							
Fertigungs- verfahren 1	45	identifiziert							
Fertigungs- verfahren 2	78	identifiziert							
Fertigungs- verfahren 3	8	identifiziert							
Messtechnik	4	identifiziert							
Handhabungs- geräte	61	identifiziert							
Stationen	74	identifiziert							
SPS-Bereiche	17	identifiziert							

Tabelle A 7: Auswertung der ausgelesenen Fügepunkte in der Produktion

	Manuelle Zahlung 2		Manuelle Zahlung 1		Fahrzeugvariante4_RL_LS2	Fahrzeugvariante4_RL_LS1	Fahrzeugvariante4_LL_LS2	Fahrzeugvariante4_LL_LS1	Fahrzeugvariante3_RL_LS2	Fahrzeugvariante3_RL_LS1	Fahrzeugvariante3_LL_LS2	Fahrzeugvariante3_LL_LS1	Fahrzeugvariante2_RL_LS2	Fahrzeugvariante2_RL_LS1	Fahrzeugvariante2_LL_LS2	Fahrzeugvariante2_LL_LS1	Fahrzeugvariante1_RL_LS2	Fahrzeugvariante1_RL_LS1	Fahrzeugvariante1_LL_LS2	Fahrzeugvariante1_LL_LS1	Roboter
XXX1_020RB_400	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX1_020RB_500	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX1_020RB_600	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX1_030RB_100	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX1_030RB_200	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX1_030RB_300	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX1_030RB_400	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX1_110RB_200	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX1_110RB_300	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX1_110RB_400	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX1_130RB_100	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
XXX1_130RB_200	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
XXX1_130RB_300	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
XXX1_130RB_400	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
XXX2_020RB_200	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX2_020RB_300	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX2_020RB_400	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX2_020RB_500	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX2_050RB_100	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX2_050RB_200	x	x					x	x			x	x									
XXX2_070RB_100	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX2_100RB_100	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
XXX2_100RB_200	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
XXX2_100RB_300	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
XXX2_100RB_400	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
XXX2_110RB_100	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
XXX2_110RB_200	xx	xx	x	x	x	xx	x	x	xx	x	xx	x	x	xx	x	x	xx	x	x	xx	x
XXX2_110RB_300	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
XXX2_110RB_400	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
XXX3_030RB_100	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
XXX3_030RB_200	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
XXX3_030RB_300	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
XXX3_030RB_400	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
XXX3_040RB_300	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
XXX3_040RB_400	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
XXX3_040RB_100	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
XXX3_040RB_200	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
XXX5_040RB_200	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX5_040RB_300	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX5_040RB_400	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX5_050RB_100	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX5_050RB_200	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX5_050RB_300	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX5_060RB_100	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX5_060RB_200	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
XXX5_060RB_300	x	x	xx	xx	x	x	xx	xx	x	x	xx	xx	x	x	xx	xx	x	x	xx	xx	x
Gesamtergebnis	485	513	476	474	485	513	476	474	473	501	464	462	473	501	464	462					

Tabelle A 8: Auswertung Fahrzeugteile mit entsprechenden Fügepunkten

Fahrzeugteile des Unterbaus	Fügepunkte am Fahrzeugteil - Entwicklung / Fahrzeugkonstruktion	Fügepunkte am Fahrzeugteil – von Roboter in Produktionsanlage	Übereinstimmung
AXXXX120015	24	24	ja
AXXXX120025	6	6	ja
AXXXX160114	20	20	ja
AXXXX160147	1	1	ja
AXXXX160214	18	18	ja
AXXXX160316	13	13	ja
AXXXX160416	18	18	ja
AXXXX211100	4	4	ja
AXXXX224800	6	6	ja
AXXXX250310	2	2	ja
AXXXX250410	3	3	ja
AXXXX110122	25	25	ja
AXXXX110123	11	11	ja
AXXXX110222	21	21	ja
AXXXX110223	8	8	ja
AXXXX120114	4	4	ja
AXXXX120214	4	4	ja
AXXXX120314	4	4	ja
AXXXX120414	4	4	ja
AXXXX160067	138	138	ja
AXXXX160116	8	8	ja
AXXXX160216	8	8	ja
AXXXX162000	8	8	ja
AXXXX260029	2	2	ja
AXXXX260055	23	23	ja
AXXXX260129	2	2	ja

Tabelle A 9: Quantitative Auswertung der Aktualität "veralteter" Datenstand Ressourcen

		Produktions- anlage 1	Produktions- anlage 2	Produktions- anlage 3	Produktions- anlage 4	Produktions- anlage 5	Z1-Linie (gesamt)
Roboter	Real (vor Ort)	27	25	43	49	19	163
	Planung	29	26	28	26	44	153
	Betrag der Differenz	2	1	15	23	25	10
	Differenz in Prozent	7,4 %	4,0 %	34,9 %	49,9 %	131,6 %	6,1 %
Fertigungs- verfahren 1	Real (vor Ort)	14	14	8	0	9	45
	Planung	13	13	19	0	0	45
	Betrag der Differenz	1	1	11	0	9	0
	Differenz in Prozent	7,1 %	7,1 %	137 %	0 %	100 %	0 %
Fertigungs- verfahren 2	Real (vor Ort)	0	0	19	58	1	78
	Planung	0	0	0	19	45	64
	Betrag der Differenz	0	0	19	39	44	14
	Differenz in Prozent	-	-	100 %	67,2 %	4400,0 %	17,9 %
Fertigungs- verfahren 3	Real (vor Ort)	5	2	0	0	1	8
	Planung	6	2	1	0	0	9
	Betrag der Differenz	1	0	1	0	1	1
	Differenz in Prozent	20 %	0 %	-	-	100 %	12,5 %
Mess- technik	Real (vor Ort)	0	0	4	0	0	4
	Planung	0	0	0	4	0	4
	Betrag der Differenz	0	0	4	4	0	0
	Differenz in Prozent	-	-	100 %	-	0	0 %
Hand- habungs- geräte	Real (vor Ort)	14	13	13	11	10	61
	Planung	13	18	11	5	12	59
	Betrag der Differenz	1	5	2	6	2	2
	Differenz in Prozent	7,1 %	38,5 %	15,4 %	54,5 %	20,0 %	3,3 %

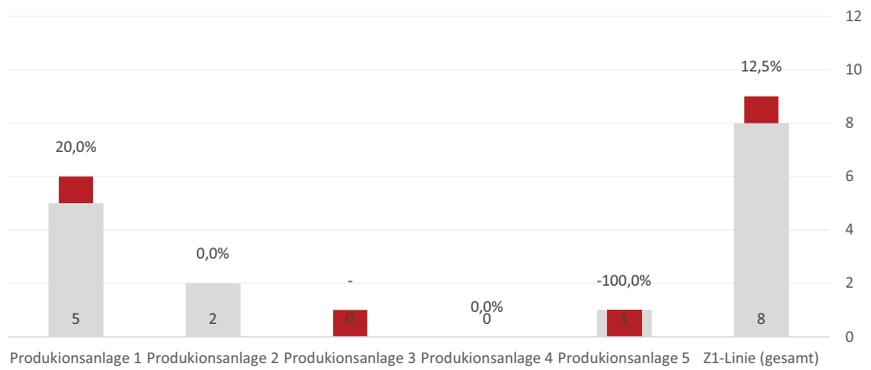


Abbildung A 1: Auswertung Abweichungen Planungsprojekt - Fertigungsverfahren 3

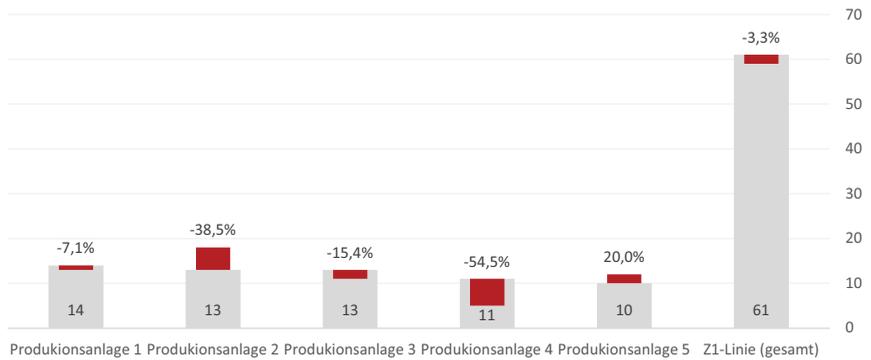


Abbildung A 2: Auswertung Abweichungen Planungsprojekt - Handhabungsgeräte

Tabelle A 10: Quantitative Auswertung der Aktualität "veralteter" Datenstand Struktur

		Produktions- anlage 1	Produktions- anlage 2	Produktions- anlage 3	Produktions- anlage 4	Produktions- anlage 5	Z1-Linie (gesamt)
Stationen	Real (vor Ort)	21	11	15	17	10	74
	Planung	13	9	10	10	16	58
	Betrag der Differenz	8	2	5	7	6	16
	Differenz in Prozent	38,1 %	18,2 %	33,3 %	41,2 %	60,0 %	21,6 %
SPS- Bereiche	Real (vor Ort)	3	3	4	5	2	17
	Planung	4	3	2	2	4	15
	Betrag der Differenz	1	0	2	3	2	2
	Differenz in Prozent	33,3 %	0 %	50,0 %	60 %	100 %	11,8 %

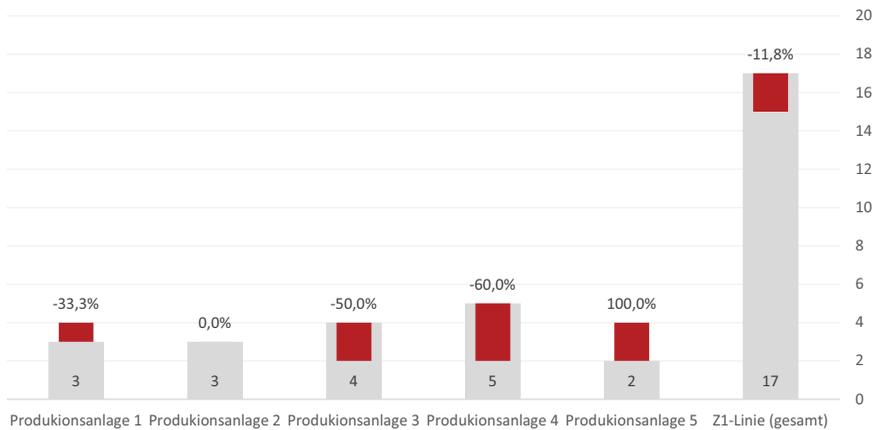


Abbildung A 3: Auswertung Abweichungen Planungsprojekt - SPS-Bereiche

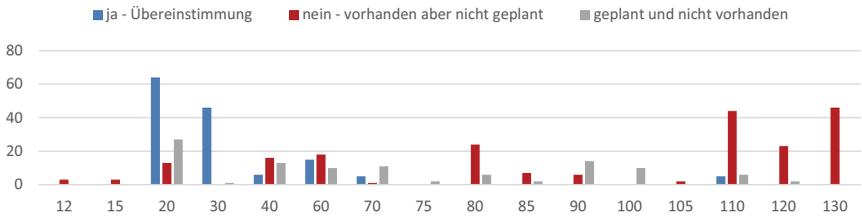


Abbildung A 4: Auswertung Ressourcen Planungsprojekt Produktionsanlage 1

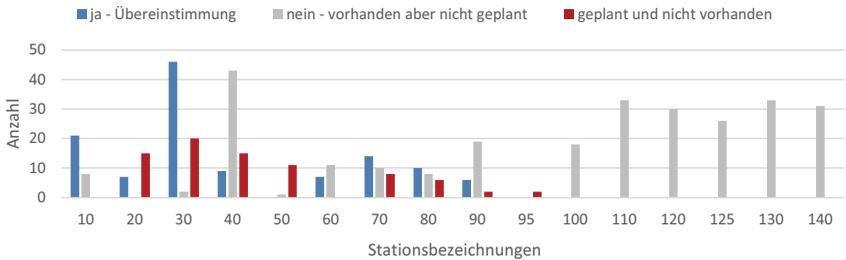


Abbildung A 5: Auswertung Ressourcen Planungsprojekt Produktionsanlage 3

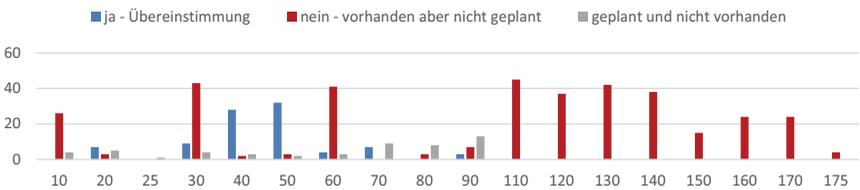


Abbildung A 6: Auswertung Ressourcen Planungsprojekt Produktionsanlage 4

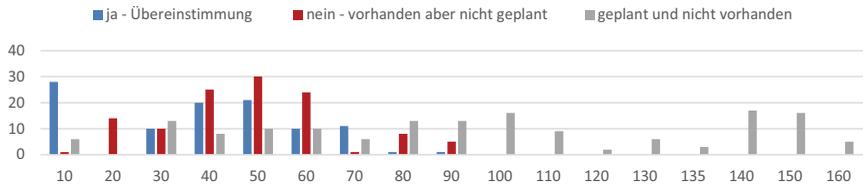


Abbildung A 7: Auswertung Ressourcen Planungsprojekt Produktionsanlage 5

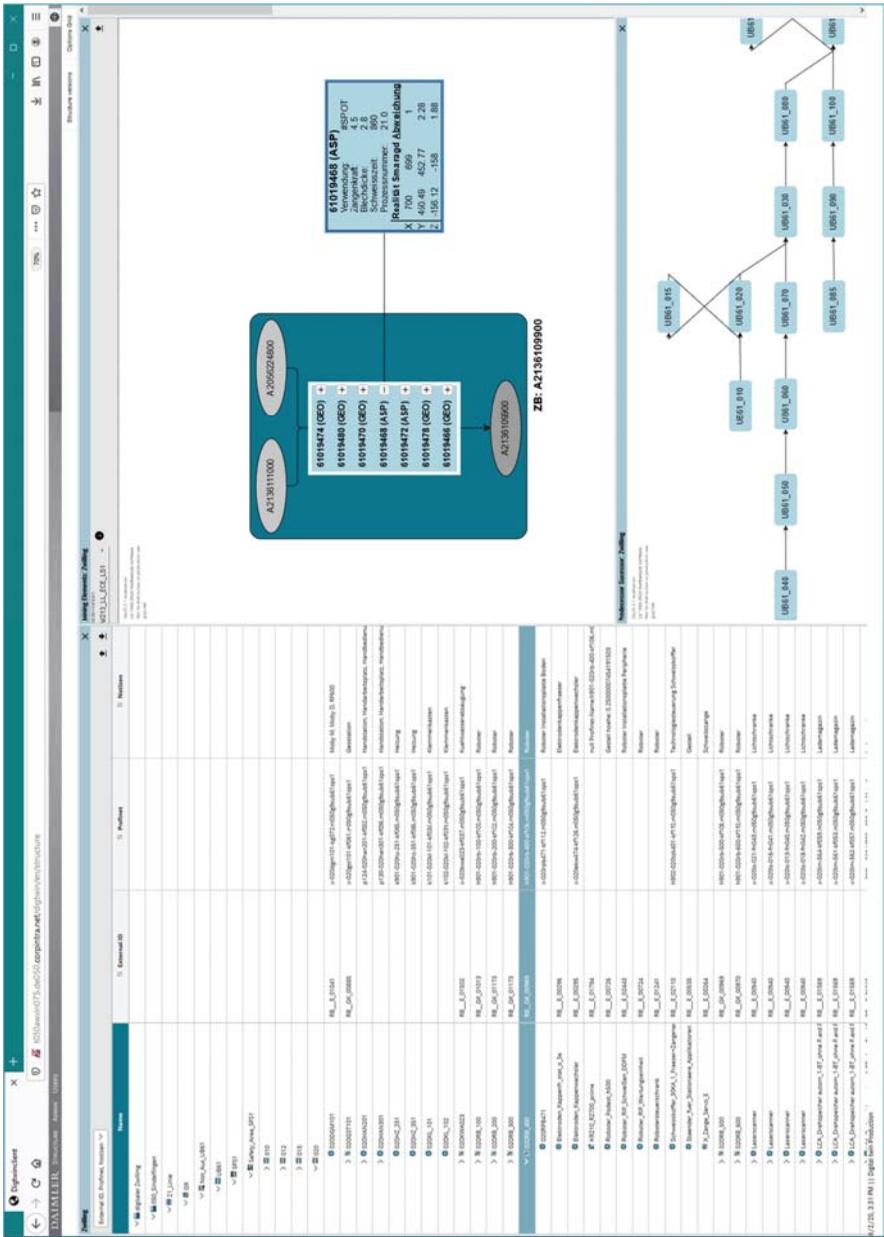


Abbildung A 8: Frontend Digitaler Zwilling

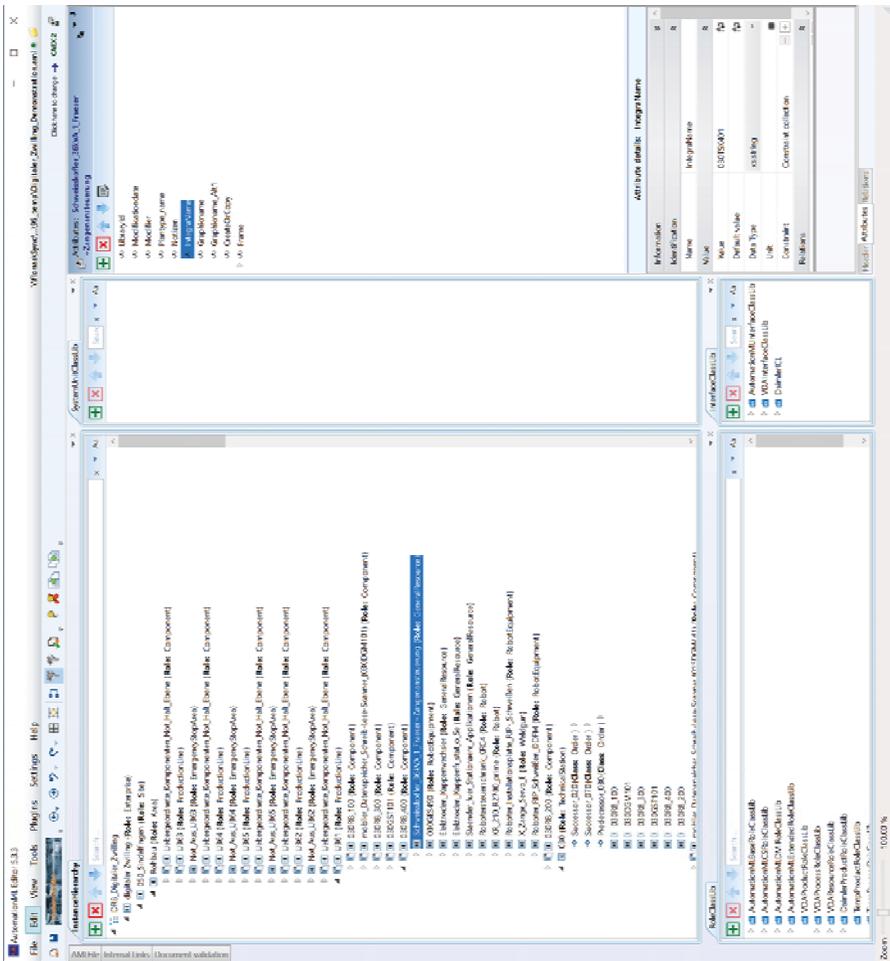


Abbildung A 9: Mengengerüst der Ressourcen und Stationsabfolge in AML



Abbildung A 10: Datenimport in den "DELMIA" Process Engineer

