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

IAS-Forschungsberichte

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 verstärken 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**

Kurzinhalt ... **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