

RESEARCH

Wolfgang Kern

Modulare Produktion

Methodik zur Gestaltung eines
modularen Montagesystems für die
variantenreiche Serienmontage im
Automobilbau

 Springer Vieweg

Modulare Produktion

Wolfgang Kern

Modulare Produktion

Methodik zur Gestaltung eines modularen Montagesystems für die variantenreiche Serienmontage im Automobilbau

Wolfgang Kern
Ingolstadt, Deutschland

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Zugl. Stuttgart, Univ., Diss., 2021

Diese Arbeit wurde gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzinitiative – GSC 262.

ISBN 978-3-658-36299-7

ISBN 978-3-658-36300-0 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-36300-0>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2021

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Stefanie Eggert

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Geleitwort

Aus der Systemtheorie wissen wir, dass Komplexität nur mit Komplexität begegnet werden kann. Die innere Komplexität ist in einem Unternehmen genau dann ideal, wenn sie der äußeren Komplexität entspricht. Wachsende Anforderungen in der Automobilindustrie wie steigende Vielfalt, Dynamik und Intransparenz über Marktbedarfe erfordern neue Produktionssysteme, die in ihrer Fähigkeit äußerer Komplexität effizient zu entsprechen weit über den Möglichkeiten klassischer Fließbandansätze liegen. Hart verkettete Bänder und ein gemeinsamer Takt sind hier nicht mehr die Mittel der Wahl.

Die vorliegende Publikation bietet eine detaillierte Analyse der heutigen Automobilmontage sowie der Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der Variantenfließfertigung und leitet den entsprechenden Handlungsbedarf ab. ***Modulare Produktion – Methodik zur Gestaltung eines modularen Montagesystems für die variantenreiche Serienmontage im Automobilbau*** ist insofern richtungweisend, als dass die Arbeit als erste überhaupt systematisch ein neues Produktionssystem für Mass Customization vorstellt. Der Ansatz erhält die Vorteile der Fließbandfertigung und überwindet gleichzeitig deren Nachteile. Er nutzt konsequent die Möglichkeiten neuer Technologien im Rahmen der Industrie 4.0. Das sind insbesondere cyber-physische Systeme, die Selbstorganisation ermöglichen und einen „Marktplatz“ zum Abgleich zwischen Bedarfen und Ressourcen schaffen.

Die Modulare Produktion ist ein umfassender Ansatz ohne Band und Takt, der Konzept, Planung und Steuerung einer Automobilmontage und Automobillogistik integrativ verbindet. Sie wird zukünftig auch außerhalb der Automobilindustrie eine immer bedeutendere Rolle spielen.

Die Arbeit von Wolfgang Kern beschreibt nicht das Ende der Fließbandfertigung, erweitert aber den Lösungsraum für Produktionssysteme signifikant und bildet damit die Basis für weitere Schritte hin zu noch größerer Flexibilität und Wandlungsfähigkeit.

Ich wünsche dem Buch viele aufmerksame Leserinnen und Leser aus Forschung und Industrie sowie den Mut, die Inspiration sowie den fachlichen Input aus der vorliegenden Arbeit zu nutzen, um Produktionssysteme neu- bzw. umzugestalten.

Stuttgart
im Oktober 2021

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Vorwort

Die vorliegende Doktorarbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand an der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) der Universität Stuttgart in Kooperation mit der AUDI AG in Ingolstadt.

Besonders danke ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit. Als Vordenker einer Produktion „ohne Band und Takt“ hat er mit seinen weitreichenden Ideen und seiner ganzheitlichen Sichtweise ein grundlegendes Vorgehen im Forschungsprojekt gefördert und durch die anregenden Diskussionen und hilfreichen Anmerkungen wesentlich zum Gelingen des Projekts beigetragen. Bei Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza bedanke ich mich für den Austausch zu den Herausforderungen und Lösungsansätzen der Arbeit und für die Übernahme des Mitberichts.

Ferner danke ich den Doktorandenkollegen, Mitarbeitern und Professoren der GSaME für die Unterstützung und die gute Zusammenarbeit sowie den fachlichen und persönlichen Austausch. Hervorzuheben sind an dieser Stelle die hilfreichen Ratschläge und die langjährige Unterstützung durch Herrn Hans-Friedrich Jacobi.

Zudem bedanke ich mich bei den zahlreichen Audi-Kollegen, die mir seit meinem Start als Masterand die Herausforderungen der Automobilmontage vermittelt, durch wertvolle Diskussionen und kritische Anmerkungen die Entwicklung einer „Alternative zur Fließbandfertigung“ unterstützt und zur Ausplanung und Simulation des Validierungsbeispiels sowie weiterer Anwendungsbereiche beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt hierbei Herrn Dr.-Ing. Fabian Rusitschka und Herrn Alois Brandt, die das Thema initiiert und mich ermutigt haben, Bestehendes zu hinterfragen und neu zu denken.

Ein Dank auch an Johannes, Witold, Hannes, Ismail, Dominik, Rhuan, Marco, Ann-Carolin, Andreas, Rebecca, Niels, Tobias, Johannes und Alexander für

euer großes Engagement, das Konzept gemeinsam weiterzuentwickeln und zu detaillieren.

Ganz besonders bedanke ich mich bei Herrn Dr. Henning Löser, Herrn Dr.-Ing. Michael Korte und Frau Verena Bossdorf für das entgegengebrachte Vertrauen und die umfassende Unterstützung sowohl bei der Fertigstellung der Arbeit als auch bei der Serienumsetzung als „Modulare Vormontage Türverkleidung ML 2“. Zur Realisierung des Konzepts tragen mittlerweile zahlreiche Kollegen bei Audi, Arculus und weiteren Unternehmen bei, um proaktiv die Zukunft zu gestalten und Vorsprung zu leben.

Meiner Familie, allen voran meiner Frau Rani, bin ich sehr dankbar für ihre Geduld, ihr Verständnis und ihre fortwährende Unterstützung, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Ingolstadt
im Dezember 2020

Wolfgang Kern

Kurzfassung

Die Fließbandfertigung hat ausgehend vom Automobilbau die industrielle Massenproduktion von Gütern ermöglicht. Durch den Wandel von einem Verkäufer zu einem Käufermarkt und die damit einhergehende Produktdifferenzierung hat sich die Organisationsform der Fließbandfertigung zu einer Variantenfließfertigung weiterentwickelt.

Die Variantenfließfertigung erlaubt – einen stabilen Variantenmix vorausgesetzt – die effiziente Herstellung ähnlicher Produktvarianten auf einer Linie. Die starre räumliche und zeitliche Verkettung („Band und Takt“) sorgt beim Abgleich zwischen den Bedarfen und den Kapazitäten für eine geringe interne Komplexität innerhalb der Linie. Im Umgang mit der gestiegenen externen Komplexität im Automobilmarkt führt dies jedoch zu einem Ungleichgewicht und erfordert zahlreiche Maßnahmen zur Stabilisierung der Bedarfe und zur Flexibilisierung der Kapazitäten. Die Variantenfließfertigung wird somit zwar durch Mehraufwände (Ineffizienz) aufrechterhalten, zugleich bestehen durch die geringe Flexibilität und Wandlungsfähigkeit allerdings auch Grenzen (Ineffektivität).

Auf Grundlage der veränderten Anforderungen an eine Automobilmontage beschreibt die „Modulare Produktion“ eine neue Organisationsform für die variantenreiche Serienmontage in einem dynamischen Umfeld. Das Konzept basiert auf der Entkopplung der Elemente und Selbstorganisation der Abläufe in einem cyber-physischen Produktionssystem. Die „Modulare Produktion“ kombiniert die hohe Arbeitsteilung einer Fließbandfertigung mit der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit einer Inselfertigung und integriert zugleich die vorgelagerten Logistik- und die nachgelagerten Fertigstellungsprozesse.

Die Gestaltungsmethodik beinhaltet die Modellierung, Planung und Steuerung eines modularen Montagesystems. Als Subsysteme werden das Wertschöpfungs-, Arbeits-, Logistik- und Transportsystem im Detail modelliert. Die Planungssystematik beschreibt den kompletten Planungsprozess mit Fokus auf den Gestaltungsregeln zur Zuordnung der Arbeitsinhalte zu Stationen („Stationsbildung“) und deren Anordnung im Layout („Stationsanordnung“). Der Schwerpunkt der Steuerungslogik liegt auf der flexiblen Zuweisung der Aufträge und der Mitarbeiter zu den Stationen (Auftrags- und Ressourcensteuerung). Darüber hinaus wird die „Modulare Produktion“ anhand von acht Merkmalen charakterisiert, als neue Organisationsform abgegrenzt und qualitativ bewertet.

Die Validierung und Evaluation der Gestaltungsmethodik erfolgt durch die Ausplanung und Simulation einer existierenden Variantenfließfertigung als „modulare Vormontage Hinterachse“. Im Anwendungsbeispiel zeigt sich – hauptsächlich durch die Reduzierung prozessbedingter Fertigungszeiten – eine Produktivitätssteigerung von 25 %, eine höhere Variantenmix- und Stückzahlflexibilität sowie eine höhere Anpassungsfähigkeit an die Mitarbeiter und an Veränderungen im Produktionssystem.

Die Organisationsform der „Modularen Produktion“ stellt im Hinblick auf die Fließbandfertigung im Automobilbau somit einen Paradigmenwechsel dar und bietet durch eine angemessene Flexibilität und Wandlungsfähigkeit die Möglichkeit, auch bei steigender Komplexität effektive und effiziente Herstellungsprozesse zu gewährleisten.

Abstract

Assembly line production has enabled mass production of goods since its implementation in car manufacturing. The shift from a seller's to a buyer's market resulting in product differentiation in the automotive market has evolved the manufacturing concept of single-model production lines into mixed-model production lines.

A steady product mix implied mixed-model production lines enable an efficient production of similar product variants in one production line. Coupled workstations and a fixed cycle time result in a low internal complexity concerning the balancing of demands and capacities in a production line. This leads to a discrepancy when dealing with the increased external complexity in the automotive market and thus numerous measures are necessary to stabilize demands and make capacities more flexible. Mixed-model production lines can be retained by these additional efforts (inefficiency), but are also limited by their low flexibility and adaptability (ineffectiveness).

Based on the changed requirements automobile assembly is facing, the concept of "Modular Production" describes a new manufacturing concept for multi-variant serial production in a dynamic environment. The modular concept is based on decoupled elements and self-organized processes in a cyber-physical production system. The concept of "Modular Production" combines line production's high division of labor with the flexibility and adaptability of cellular concepts and integrates upstream logistics and downstream rework processes.

The concept's design methodology includes the modeling, production planning and control of a modular assembly system. Stations, resources, logistics and transportation are modeled as subsystems in detail. Planning methods describe the entire planning process focusing on the design principles to assign assembly tasks to stations ("station planning") and allocate these stations in the layout

(“layout planning”). The focal point of production control is the flexible assignment of orders and workers to stations (alignment of demand and capacity). Moreover, “Modular Production” is characterized by eight attributes, defined as a new production concept and qualitatively assessed.

The validation and evaluation of the design methodology is applied by planning and simulating an existing mixed-model assembly line as modular assembly system. The case study shows – mainly due to a reduction of process-related production times – a productivity increase of 25 %, a higher flexibility in terms of product mix and output rate as well as a higher adaptability to workers and to changes in the production system.

The production concept of “Modular Production” therefore represents a paradigm shift concerning assembly line production in car manufacturing. In light of increasing complexity, it ensures effective and efficient manufacturing processes by providing appropriate flexibility and adaptability.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.1.1	Automobilproduktion am Fließband	1
1.1.2	Entwicklung der Automobilproduktion	3
1.1.3	Neue Herausforderungen und neue Möglichkeiten	4
1.1.4	Bedeutung der Automobilbranche und Automobilproduktion	5
1.2	Problemstellung	7
1.2.1	Fließbandfertigung als Organisationsform	7
1.2.2	Entwicklung zur Variantenfließfertigung	8
1.2.3	Grundproblem der Variantenfließfertigung	10
1.3	Zielsetzung und Forschungsfrage	12
1.3.1	Problemverständnis und Zielsetzung der Arbeit	12
1.3.2	Forschungsfrage und Teilaspekte zur Zielerreichung	14
1.3.3	Abgrenzung des Betrachtungsgegenstands	14
1.4	Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	17
1.4.1	Wissenschaftstheoretische Einordnung	17
1.4.2	Vorgehensweise im Forschungsprojekt	20
1.4.3	Aufbau der Arbeit	20
2	Organisation, Planung und Steuerung der Montage im Automobilbau	23
2.1	Automobilproduktion	23
2.1.1	Automobilindustrie als Branche	23
2.1.2	Rolle der Produktion im Unternehmen	25
2.1.3	Automobilmontage	28

2.2	Fließbandfertigung	30
2.2.1	Organisationsform der Fließbandfertigung	30
2.2.2	Planung und Aufbau einer Fließbandmontage	33
2.2.3	Steuerung und Ablauf einer Fließbandmontage	37
2.3	Variantenfließfertigung	38
2.3.1	Entwicklung zur Ausprägung der Variantenfließfertigung	38
2.3.2	Planung und Aufbau einer Variantenfließmontage	40
2.3.3	Steuerung und Ablauf einer Variantenfließmontage	44
2.4	Situation der Variantenfließfertigung in der Automobilmontage	46
2.4.1	Derzeitige Problemstellung in der Automobilmontage	46
2.4.2	Umgang mit Komplexität in der Variantenfließmontage	51
2.4.3	Ineffizienz und Ineffektivität der Variantenfließmontage	57
2.5	Anforderungen an die Montage im Automobilbau	63
2.5.1	Herausforderungen in der Automobilmontage	63
2.5.2	Anforderungen an ein Montagesystem im Automobilbau	68
2.5.3	Zwischenfazit zur Montage im Automobilbau	79
3	Grundlagen zur Gestaltung von Produktionssystemen	83
3.1	Methodische Grundlagen zur Beschreibung von Systemen	83
3.1.1	Systemtheorie und ganzheitliches Denken	83
3.1.2	Struktur von Systemen	85
3.1.3	Verhalten von Systemen	89
3.2	Grundlagen zur Organisation einer Produktion	94
3.2.1	Produktstruktur, Prozessplan und Produktionssystem	94
3.2.2	Organisationsformen der Produktion	96
3.2.3	Ansätze und Konzepte ohne Band und Takt	101
3.2.4	Bewertung von Produktionssystemen	112
3.3	Planung und Struktur von Produktionssystemen	115
3.3.1	Art und Aufgabe der Planung von Produktionssystemen	115
3.3.2	Phasen der Planung von Produktionssystemen	117
3.3.3	Neue Ansätze bei der Planung von Montagesystemen	118

3.4	Steuerung und Betrieb eines Produktionssystems	122
3.4.1	Steuerungsaufgabe und Datengrundlage	122
3.4.2	Programmplanung und -steuerung, Produktionssteuerung	123
3.4.3	Neue Ansätze bei der Steuerung von Montagesystemen	126
3.5	Fazit zur Gestaltung von Montagesystemen im Automobilbau	127
3.5.1	Anforderungen an eine Gestaltungsmethodik	127
3.5.2	Einordnung der bestehenden Ansätze und Konzepte	129
3.5.3	Fazit zur Gestaltung einer Automobilmontage	131
4	Konzept eines modularen Produktionssystems	133
4.1	Die „Modulare Produktion“ als neue Organisationsform	133
4.2	Lösungsansatz der Modularen Produktion	135
4.2.1	Entkoppelte Stationen	135
4.2.2	Selbstorganisiertes Produktionssystem	138
4.2.3	Integriertes Gesamtsystem	140
4.3	Planung und Steuerung einer modularen Produktion	145
5	Methodik zur Gestaltung eines modularen Montagesystems	149
5.1	Modellierung eines modularen Produktionssystems	149
5.1.1	Modulares Produktionssystem	151
5.1.2	Subsystem „Prozess“ (Wertschöpfungssystem)	155
5.1.3	Subsystem „Ressourcen“ (Arbeitssystem)	159
5.1.4	Subsystem „Produktionslogistik“ (Logistiksystem)	161
5.1.5	Subsystem „Transport“ (Transportsystem)	164
5.2	Planungssystematik eines modularen Montagesystems	166
5.2.1	Datenbasis für die Planung eines Montagesystems	166
5.2.2	Struktur- und Kapazitätsplanung (Konzeptplanung)	168
5.2.3	Zuordnung der Arbeitsinhalte zu Stationen (Stationsbildung)	170
5.2.4	Anordnung der Stationen im Layout (Layoutplanung)	175
5.2.5	Detailplanung eines modularen Montagesystems	179
5.3	Steuerungslogik eines modularen Montagesystems	182
5.3.1	Datenbasis für die Steuerung eines Montagesystems	182

5.3.2	Steuerungssystem einer modularen Montage	183
5.3.3	Auftragssteuerung in einem modularen Montagesystem	186
5.3.4	Ressourcensteuerung in einem modularen Montagesystem	195
5.3.5	Logistiksteuerung in einem modularen Montagesystem	201
5.3.6	Transportsteuerung in einem modularen Montagesystem	206
5.4	Charakterisierung und qualitative Bewertung	210
5.4.1	Organisationsform „Modulare Produktion“	211
5.4.2	Qualitative Bewertung eines modularen Produktionssystems	215
5.4.3	Paradigmenwechsel gegenüber einer Variantenfließfertigung	219
6	Validierung und Evaluation anhand eines Anwendungsbeispiels ...	223
6.1	Eignungskriterien und Auswahl von Anwendungsbeispielen ...	223
6.1.1	Eignungskriterien eines modularen Produktionssystems	223
6.1.2	Auswahl der Vormontage Hinterachse zur Validierung	226
6.1.3	Auswahl der Vormontage Türverkleidung zur Umsetzung	227
6.2	Anwendung der Planungssystematik	229
6.2.1	Daten für die Planung der modularen Hinterachsvormontage	229
6.2.2	Konzeptplanung der modularen Vormontage Hinterachse	234
6.2.3	Stationsbildung in der modularen Vormontage Hinterachse	238
6.2.4	Anordnung der Stationen in der vorhandenen Fläche ...	243
6.2.5	Detailplanung der modularen Vormontage Hinterachse	248
6.3	Implementierung der Steuerungslogik in einer Simulation	253
6.3.1	Auswahl einer geeigneten Simulationssoftware	253
6.3.2	Datenbasis für das Simulationsmodell	254

6.3.3	Implementierung des Simulationsmodells	256
6.3.4	Anwendung des Simulationsmodells	263
6.4	Ergebnisse und Bewertung des Anwendungsbeispiels	267
6.4.1	Ausplanung als modulare Vormontage Hinterachse ML 3	267
6.4.2	Simulation der modularen Vormontage Hinterachse ML 3	274
6.4.3	Einordnung und Übertragbarkeit des Anwendungsbeispiels	278
7	Zusammenfassung und Ausblick	285
7.1	Zusammenfassung der Arbeit	285
7.2	Kritische Würdigung und Grenzen der Arbeit	288
7.3	Implikationen für die Wissenschaft und für die Industrie	294
7.4	Ausblick zur Montage im Automobilbau	297
	Anhang	299
	Literaturverzeichnis	349

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitsplatz
BNK	Beschaffungsnebenkosten
BPMN	Business Process Model and Notification
CPS	Cyber-physisches System
DLZ	Durchlaufzeit
DZS	Drehzahlsensor
EBR	Einbaurrate (auch Verbaurrate)
EC	Electronically controlled (dt. elektronisch gesteuert)
eHPV	Engineered hours per vehicle (dt. konstruktionsbedingte Fertigungszeit)
EPB	Electric parking brake (dt. elektrische Feststellbremse)
ETA	Estimated time of arrival (dt. erwartete/voraussichtliche Ankunftszeit)
F&E	Forschung und Entwicklung
F-Zeit	Fertigungszeit (Vorgabezeit, insb. für manuelle Arbeitsvorgänge)
FIFO	„First-in-first-out“-Prinzip
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
FTS	Fahrerloses Transportsystem
GLT	Großladungsträger
GM	General Motors Corporation („Old GM“, bis 2009) bzw. General Motors Company („New GM“, seit 2009)
GVZ	Güterverkehrszentrum
HA	Hinterachse
HMI	Hannover Messe Industrie
IIOT	Industrial Internet of Things (dt. Industrielles Internet der Dinge)
IMVP	International Motor Vehicle Program (Forschungsprojekt am MIT)
IPA	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, Stuttgart

JIS	Just-in-sequence (dt. reihenfolgegerecht)
JIT	Just-in-time (dt. bedarfsgerecht)
KLT	Kleinladungsträger
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LGW	Leistungsgewandelte (Mitarbeiter)
LWR	Leuchtweitenregulierung
MA	Mitarbeiter
MIT	Massachusetts Institute of Technology in Cambridge, Massachusetts, USA
ML	Mehrlenker (Produktart einer Hinterachse)
ML 2	Montagelinie 2 im Audi-Werk Ingolstadt (Audi A4 Limousine, Audi A4 Avant, Audi A5 Coupé, Audi A3 Limousine)
ML 3	Montagelinie 3 im Audi-Werk Ingolstadt (Audi A3 Sportback, Audi Q2)
MTM	Methods-Time Measurement (dt. Arbeitsablauf-Zeitanalyse, AAZ)
NA	Nacharbeit (auch Fertigstellung)
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PR	Primäreigenschaft (primäre Produkteigenschaft)
SuMa	Supermarkt, i. S. v. Kommissionierbereich
SLT	Sonderladungsträger bzw. Spezialladungsträger
TPS	Toyota Produktionssystem
TMU	Time Measurement Unit (Zeiteinheit von 0,036 Sekunden, vgl. MTM)
TVKL	Türverkleidung, Türinnenverkleidung
UML	Unified Modeling Language
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
VL	Verbundlenker (Produktart einer Hinterachse)
VM	Vormontage, Vormontagebereich
WIP	Work in process (dt. Umlaufbestand)
WIS	Werkerinformationssystem
XaaS	X (= Everything) as a Service (dt. „alles“ als Service, serviceorientiert)
ZSB	Zusammenbau einer Baugruppe (als Zwischenprodukt)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1	Historische Fließbandfertigung (Ford Model T) © Ford Motor Comp. und moderne Variantenfließfertigung (Audi A3, A4 und A5) © AUDI AG	2
Abbildung 1.2	Wertschöpfungsnetzwerk der Automobilwirtschaft i. A. a. Nieuwenhuis (2018, S. 38), ifo (2019, S. 5)	6
Abbildung 1.3	Die sieben Phasen der angewandten Forschung nach Ulrich (2001, S. 195) im Verhältnis zum Aufbau der Arbeit	21
Abbildung 2.1	Anteil der deutschen Automobilindustrie am Exportüberschuss, an den F&E-Aufwänden und den Beschäftigten im verarbeitenden Gewerbe i. A. a. Statista (2019a, S. 16), StBA (2018), VDA (2018, S. 16), Kaul et al. (2019, S. 66 f.), StBA (2019, S. 524)	25
Abbildung 2.2	Vier Lebenszyklen der Produktion i. A. a. Bauernhansl (2014, S. 25)	26
Abbildung 2.3	Grundstruktur einer Automobilmontage mit Hauptlinie (Fahrzeug- bzw. Endmontage) und Nebenlinien (Vormontagen) (Keckl 2017, S. 18)	28
Abbildung 2.4	Austaktung nach einer Einheitsvariante (links) bzw. nach der Maximalvariante (rechts, mit Zeitspreizung) i. A. a. Gans et al. (2011, S. 163)	35

Abbildung 2.5	Arbeitstakt (räumlich) und Zeit-Weg-Diagramm (zeitlich-räumlich) einer Fließbandmontage i. A. a. Gans (2008, S. 10), Keckl (2017, S. 42, 91)	36
Abbildung 2.6	Ausprägungen einer Fließfertigung i. A. a. Scholl (1999, S. 7), Boysen (2005, S. 11)	39
Abbildung 2.7	Austaktung nach einer Durchschnittsvariante (mit Zeitspreizung und Überlast) i. A. a. Gans et al. (2011, S. 163), Klug (2010, S. 169)	42
Abbildung 2.8	Arbeitstakt (räumlich) und Zeit-Weg-Diagramm (zeitlich-räumlich) einer Variantenfließmontage i. A. a. Gans (2008, S. 10), Keckl (2017, S. 42, 91)	43
Abbildung 2.9	Produktportfolio der AUDI AG (Deutschland, Juli 2020) © AUDI AG	47
Abbildung 2.10	Dauer des Produktlebenszyklus und Stückzahl je Produktgeneration am Beispiel des VW Golf i. A. a. Volkswagen (2019)	48
Abbildung 2.11	SUV-Neuzulassungen und deren Marktanteil in Deutschland 1995 bis 2019 (d. h. etwa drei Modellzyklen) (Vetter 2019)	49
Abbildung 2.12	Stückzahl je Modellvariante (Derivat) der AUDI AG i. A. a. Kern et al. (2015, S. 2)	50
Abbildung 2.13	Reduktion der Zeitspreizung (AP-Gestaltung) (Jander 2012, S. 39)	54
Abbildung 2.14	Kompensation der Zeitspreizung durch die AP-Gestaltung (Altemeier 2009, S. 12)	56
Abbildung 2.15	Tagesauslastung der Arbeitsplätze und Streuung der Auslastung je Auftrag (externe vs. interne Unterschiede) in einer sog. „Stabilitätsmatrix“ i. A. a. Keckl et al. (2016, S. 204 f.), Altemeier (2009, S. 50–54)	58
Abbildung 2.16	Entwicklung des Logistikaufwands im Werk Ingolstadt (2006 bis 2015) (Kern et al. 2017, S. 960 i. A. a. Roth (2016, S. 237))	59
Abbildung 2.17	Grundlegende Nachfrageänderung innerhalb eines Produktlebenszyklus am Beispiel Audi Q5 (1. Generation) i. A. a. Audi (2017, S. 112)	63
Abbildung 2.18	AI:ME (urban) und AI:TRAIL quattro (off-track) © AUDI AG	64

Abbildung 2.19	AI:CON (long distance) und AI:RACE (performance) © AUDI AG	65
Abbildung 2.20	Volkswagen SEDRIC („Robotaxi“) und Lilium Jet („Flugtaxi“) © Volkswagen AG, Lilium GmbH ...	66
Abbildung 2.21	Flexibilität und Wandlungsfähigkeit eines Systems i. A. a. Zäh et al. (2005, S. 4), Wiendahl et al. (2014, S. 129)	70
Abbildung 3.1	Funktionales (a), struktureles (b) und hierarchisches (c) Systemkonzept (Ropohl 2009, S. 76)	84
Abbildung 3.2	Ungerichteter, gerichteter zyklischer und gerichteter azyklischer Graph i. A. a. Domschke et al. (2015, S. 71 f.); Hu et al. (2011, S. 716 f.)	87
Abbildung 3.3	Prinzip der Rückkopplung (Regelkreis) i. A. a. Bauer et al. (2020, S. 93), Kropik (2009, S. 145), Keckl (2017, S. 53)	90
Abbildung 3.4	Unabhängige, modulare und integrale Struktur (Göpfert 1998, S. 32)	93
Abbildung 3.5	Produktstruktur mit Produkt- und Ausstattungsvarianz am Beispiel eines Automobils (Keckl 2017, S. 15)	95
Abbildung 3.6	Liaison-Graph (ungerichtet) und Montagevorranggraph (gerichtet azyklisch) (Kern und Bauernhansl 2017, S. 412 i. A. a. Hu et al. 2011, S. 716 f.)	95
Abbildung 3.7	Systemebenen der Produktion am Beispiel der Automobilproduktion (Keckl 2017, S. 13)	96
Abbildung 3.8	Produktionsarten (Produktionstypen) mit „Outpacing Strategy“ i. A. a. Eversheim (1989, S. 11), Schuh (2005, S. 266), Gilbert und Strebel (1987, S. 32)	97
Abbildung 3.9	U-förmige Fertigungsinsel (links) (Soder 2014, S. 98) © SEW – mit variablem Kapazitätsangebot (rechts)	99
Abbildung 3.10	Maschinenbelegungsplanung und Simulation einer Getriebefertigung (Hohwieler 2017, S. 17, 36)	103

Abbildung 3.11	„Riegelkonzept“ mit Mini-Regalbediengerät (fest installiert) und Karossen-FTF mit Stehplattform (und Hub-/Neigeeinrichtung) © IFT	104
Abbildung 3.12	Vision von räumlich verteilten Fertigungszellen (BMW 2013) und „Maxi-Demonstrator“ (Abschlusspräsentation im November 2016) Foto: privat	104
Abbildung 3.13	Frei verkettetes Montagesystem (Hüttemann 2018, S. 5)	105
Abbildung 3.14	Mehrfache Zuordnung von Prozessschritten (Greschke et al. 2014, S. 162) und Simulationsmodell (Koch 2019, S. 16) © Jungheinrich	106
Abbildung 3.15	„Universallinie“ im Siemens-Elektronikwerk Amberg (Bierschneider 2017, S. 14 f.) © Siemens AG	107
Abbildung 3.16	Vision einer „Lean Smart Factory“ (mit mobilen Assistenten) und Messestand auf der HMI 2019 (mit e.GO-Mobile) © SEW Eurodrive	108
Abbildung 3.17	Audi-Versuchsanlage „Modulare Montage“ aus 2016 © AUDI AG	109
Abbildung 3.18	Karosseriebau-Konzept „Matrixproduktion“ (Borkeloh 2019, S. 6) und Pilotzelle aus 2018 (im „Smart Production Center“, Augsburg) (KUKA 2018) © KUKA	109
Abbildung 3.19	E-Motoren-Fertigung im Audi-Werk Győr © Audi Hungaria	110
Abbildung 3.20	Volkswagen „Smart Production Optimizer“ (SPL 2018, S. 10) bzw. Synaos „Adaptive Online Scheduler“ (Hackenberg und Gagern 2019, S. 24)	110
Abbildung 3.21	Grobkonzept einer „Schwarmmontage“ aus Linien- und Inselmontage (Ingenics 2018, S. 7)	111
Abbildung 3.22	BCG-Studie „Flexible-Cell Manufacturing“ (Küpper et al. 2018, S. 7)	112
Abbildung 3.23	Phasenmodell des Fabrikplanungsprozesses (VDI 5200-1, S. 8)	117
Abbildung 3.24	Honda-Konzept „ARC line“ © Honda Thailand	119
Abbildung 3.25	Montage auf FTS, aber in Linie © AUDI AG, Porsche AG	120

Abbildung 3.26	Konzept der variablen Anstoßrate bzw. Auflegeintervalle bei Fendt (in Marktoberdorf) (Bebersdorf 2017, S. 30) © AGCO	121
Abbildung 3.27	Prozess der Programmplanung und -steuerung bei kundenauftragsbezogener Produktion (Holweg und Pil 2005, S. 20)	123
Abbildung 4.1	Wertschöpfung in den entkoppelten Stationen	137
Abbildung 4.2	Selbstorganisierter Bedarfs-Kapazitäts-Abgleich	140
Abbildung 4.3	Ganzheitliche Betrachtung im integrierten Gesamtsystem	142
Abbildung 5.1	Klassendiagramm des modularen Produktionssystems (vereinfacht)	152
Abbildung 5.2	Generisches Modell eines modularen Produktionssystems	154
Abbildung 5.3	Generisches Modell einer entkoppelten Station	156
Abbildung 5.4	Klassendiagramm einer Station (Wertschöpfungssystem, vereinfacht)	157
Abbildung 5.5	Klassendiagramm des Arbeitssystems (vereinfacht)	160
Abbildung 5.6	Klassendiagramm des Logistiksystems (vereinfacht)	162
Abbildung 5.7	Klassendiagramm des Transportsystems (vereinfacht)	165
Abbildung 5.8	Vorranggraph der Verbauumfänge (Beispiel) – mit Tagesbedarf je Umfang (in Minuten) und variantenspezifischen Verbauumfängen (gestrichelt)	171
Abbildung 5.9	Vorranggraph der Stationen (Beispiel) – mit Tagesbedarf je Station (in Minuten) und variantenspezifischen Stationen (gestrichelt)	174
Abbildung 5.10	Systembild „Integrierte Steuerung einer modularen Produktion“	185
Abbildung 5.11	Aktivitätsdiagramm „Auftragssteuerung im modularen Produktionssystem“ (vereinfacht)	189
Abbildung 5.12	Aktivitätsdiagramm „Auftragsbearbeitung in einer Station“ (vereinfacht)	192
Abbildung 5.13	Zustandsdiagramm „Betriebszustand Station bzw. Arbeitsplatz“ (vereinfacht)	194

Abbildung 5.14	Dynamischer Vorranggraph mit Störungsfällen (produktseitige und ressourcenseitige Beispiele)	195
Abbildung 5.15	Aktivitätsdiagramm „Zyklische Überprüfung bzw. Anpassung der Arbeitsplatzbelegung“ (vereinfacht)	198
Abbildung 5.16	Aktivitätsdiagramm „Teilebereitstellung in einem Supermarkt 2.0 am Verbauort“ (vereinfacht)	203
Abbildung 5.17	Standardkreuzung (12 Kombinationen aus Ein- und Ausfahrt) und Kreuzungsmatrix mit Nutzung und Auswirkung (1: freigegeben, 0: blockiert)	207
Abbildung 5.18	Nutzung als Weg und als Puffer mit „Schleifenfahrt (Platzrunde)“	208
Abbildung 6.1	Hinterachse (Audi A3 bzw. Q2) – Türverkleidung (Audi A4 bzw. A5)	228
Abbildung 6.2	Produktvarianten der Vormontage Hinterachse ML 3	230
Abbildung 6.3	Vormontage Hinterachse ML 3 in Halle F im GVZ Ingolstadt	233
Abbildung 6.4	Vorranggraph Verbundlenker (inkl. Bedarf je Verbauumfang) – 24 Verbauumfänge, davon sieben gemeinsam mit Mehrlenker (hellgrau)	234
Abbildung 6.5	Vorranggraph Mehrlenker (inkl. Bedarf je Verbauumfang) – 32 Verbauumfänge (inkl. Vormontagen), davon fünf nur ML quattro (gestrichelt)	235
Abbildung 6.6	GLT-Standardbehälter „111 820“ (1,2 x 1,0 m), FTF mit Unterfahrtisch und GLT-Kunststoffbehälter „114 888“ (1,3 x 1,1 m) © Volkswagen AG, AUDI AG	237
Abbildung 6.7	Vorranggraph Verbundlenker (8 Stationen)	242
Abbildung 6.8	Vorranggraph Mehrlenker (11 Stationen inkl. Vormontagen)	243
Abbildung 6.9	„Mischgraph“ von Verbundlenker und Mehrlenker (14 Stationen)	243
Abbildung 6.10	Einheitliches Raster (5 x 5 m) nach dem Stationslayout und der Wegbreite (Diagonale der Werkstückträger = ca. 2 m)	244
Abbildung 6.11	Vereinfachtes Ideallayout nach dem Fertigungsfluss (Mischgraph)	244

Abbildung 6.12	Vollständiges Ideallayout (40 x 55 m = 2.000 m ²) ...	245
Abbildung 6.13	Layout GVZ Halle F mit Produktsenke, Materialquellen und -senken	246
Abbildung 6.14	Layout „Modulare VM Hinterachse ML 3“ (45 x 45 m = 2.025 m ²)	247
Abbildung 6.15	Grundlayout der Stationen (6 x 4 m = 24 m ² , einseitig 1-2 APs)	249
Abbildung 6.16	Layout St. 8 „Querlenker Oben“ mit statischer Bereitstellung	250
Abbildung 6.17	Layout Station 11 „Schraubenfeder“ mit „SuMa 2.0 am Verbauort“	251
Abbildung 6.18	Simulationsmodell „Modulare Vormontage Hinterachse ML 3“	261
Abbildung 6.19	Fertigungszeit der Variantenfließfertigung (links, 100 %) und der modularen Produktion (rechts, 80,3 %) im Vergleich	269
Abbildung 6.20	Fertigstellungsrate (jobs per hour) mit Ziel- und Durchschnittswert	275
Abbildung A.1	Arbeitsstunden je Fahrzeug (konstruktions- bzw. prozessbedingter Anteil) nach Wilson und McKinlay (2010, S. 768)	302
Abbildung A.2	Auflösung der hierarchischen Automatisierungspyramide zu cyber-physischen Systemen (CPS) mit verteilten Diensten (VDI/VDE 2013, S. 4)	307
Abbildung C.1	Klassendiagramme „Produkt bzw. Auftrag“, „Station“, „Arbeitsplatz“ und „Mitarbeiter“ (vereinfacht)	329
Abbildung D.1	Versorgung der Einbauvorbereitung Fahrwerk ML 3 im Werk Ingolstadt	337
Abbildung D.2	Stationen „Modulare VM HA ML 3“ im einheitlichen Raster (5 x 5 m)	339
Abbildung D.3	Layout Station 1 a/b „ML quattro-VM“ (Produktquelle ML quattro)	339
Abbildung D.4	Layout St. 2 „Auflage Hilfsrahmen (VL, ML f)“ (Quelle VL und ML front)	340
Abbildung D.5	Layout Station 3 a/b „Achszapfen und Radlagereinheit“	340
Abbildung D.6	Layout Station 4 „Lagerbock“	341

Abbildung D.7	Layout Station 5 „Spurstange und Stabilisator“	341
Abbildung D.8	Layout Station 6 a/b „Querlenker (Federlenker) und Radantrieb“	342
Abbildung D.9	Layout Station 7 a/b „Bremsen“	342
Abbildung D.10	Layout Station 9 „Radantrieb EC“	343
Abbildung D.11	Layout Station 10 a/b „Stoßdämpfer“	343
Abbildung D.12	Layout St. 14 a/b „Prüfung und Ablage ZSB Hinterachse“ (Senke)	344
Abbildung D.13	Simulationsmodell „Ressourcensteuerung“ (2. Detaillierungsstufe)	344

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1	Betrachtungsgegenstand der Arbeit i. A. a. Bauernhansl (2003, S. 9–11)	17
Tabelle 1.2	Aufbau der Arbeit in sieben Kapiteln	22
Tabelle 2.1	Ansätze im Umgang mit Komplexität in der Variantenfließmontage	52
Tabelle 2.2	Spezifische Anforderungen an ein Montagesystem im Automobilbau	76
Tabelle 2.3	Bewertung der Ausprägung als „Variantenfließfertigung“ (Ist-Situation)	77
Tabelle 2.4	Anforderungen an die Informationsqualität i. A. a. Rohweder et al. (2015)	79
Tabelle 2.5	Übergeordnete Anforderungen zur Überwindung heutiger Zielkonflikte	80
Tabelle 3.1	Dimensionen und Bestandteile der Komplexität eines Systems i. A. a. Ulrich und Probst (1995, S. 57–65), Schuh (2005, S. 5–12)	88
Tabelle 3.2	Flexibilitätsarten in einem Produktionssystem	91
Tabelle 3.3	Wandlungsbefähiger i. A. a. Wiendahl et al. (2014, S. 132–135)	92
Tabelle 3.4	Ausgewählte Organisationsformen der Produktion im Vergleich i. A. a. Petersen (2005, S. 34–42, 115–123); Eversheim (1989, S. 176), Boysen (2005, S. 7)	98
Tabelle 3.5	Übersicht zu Ansätzen und Konzepten ohne Band und Takt	102
Tabelle 3.6	Wichtige Kennzahlen in der Produktion (Übersicht)	115

Tabelle 3.7	Anforderungen an die Gestaltungsmethodik eines Produktionssystems	129
Tabelle 3.8	Erfüllung der Anforderungen durch vorhandene Organisationsformen (vgl. Abschn. 3.2.2) bzw. durch bestehende Ansätze ohne Band und Takt (vgl. Abschn. 3.2.3)	130
Tabelle 4.1	Drei Grundprinzipien eines modularen Produktionssystems (vgl. Abschn. 4.2)	133
Tabelle 4.2	Gegenüberstellung von spezifischen Anforderungen und Lösungsansatz – mit einer Bewertung der Variantenfließfertigung (Ist-Situation, vgl. Tab. 2.3) und der Modularen Produktion (Soll-Konzept, vgl. Tab. 7.3)	143
Tabelle 4.3	Veränderung der Planungsaufgaben in einer modularen Produktion	146
Tabelle 4.4	Veränderung der Steuerungsaufgaben in einer modularen Produktion	148
Tabelle 5.1	Bestandteile der Gestaltungsmethodik eines modularen Montagesystems	150
Tabelle 5.2	Art, Inhalt und Verwendung von Graphen i. A. a. Kern und Bauernhansl (2017, S. 414)	168
Tabelle 5.3	Zuordnungsregeln – Stationsbildung einer modularen Produktion	173
Tabelle 5.4	Anordnungsregeln – Layoutplanung einer modularen Produktion	176
Tabelle 5.5	Grundprinzipien des Steuerungskonzepts einer modularen Produktion	184
Tabelle 5.6	Arten der Auftragsfreigabe an der Quelle (Inputsteuerung)	187
Tabelle 5.7	Arten der Auftragsfreigabe nach der Bearbeitung in einer Station	188
Tabelle 5.8	Dynamischer Vorranggraph der Stationen eines Auftrags (Beispiel)	189
Tabelle 5.9	Liste möglicher Stationen mit Status und Entscheidung (Beispiel)	190
Tabelle 5.10	Monitoring der Auftragssteuerung – Elemente und deren Zustände	193
Tabelle 5.11	Liste der Mitarbeiter (MA), d. h. Kapazitätsangebot (Beispiel)	196

Tabelle 5.12	Liste der Arbeitsplätze (AP) mit Kapazitätsbedarfen (Beispiel)	197
Tabelle 5.13	Monitoring der Ressourcensteuerung – Elemente und deren Zustände	200
Tabelle 5.14	Monitoring der Logistiksteuerung – Elemente und deren Zustände	205
Tabelle 5.15	Monitoring der Transportsteuerung – Elemente und deren Zustände	210
Tabelle 5.16	Die „8 Merkmale der Modularen Produktion“ (in vier Dimensionen)	211
Tabelle 5.17	Einordnung der Organisationsform „Modulare Produktion“ (vgl. Tab. 3.4) (Kern et al. 2016, S. 329 i. A. a. Petersen 2005)	215
Tabelle 5.18	Paradigmenwechsel der Modularen Produktion im Überblick	219
Tabelle 6.1	Eignungskriterien eines modularen Produktionssystems	226
Tabelle 6.2	Produkt- und Ausstattungsvarianz der vorzumontierenden Hinterachsen	230
Tabelle 6.3	Vorgabezeiten vor der Anpassung der prozessbedingten F-Zeiten (Ist)	231
Tabelle 6.4	Vorgabezeiten nach der Anpassung der prozessbedingten F-Zeiten (Soll)	236
Tabelle 6.5	Anmerkungen zur Anwendung der acht Zuordnungsregeln	238
Tabelle 6.6	Stationen der „Modularen Vormontage Hinterachse ML 3“ (vgl. Tab. D-6)	242
Tabelle 6.7	Dynamischer Vorranggraph eines Auftrags (ML f) (vgl. Abb. 6.8)	257
Tabelle 6.8	Fertigungsflussmatrix mit möglichen Stationsabfolgen	258
Tabelle 6.9	Kennzahlen zur Bewertung der modularen VM Hinterachse ML 3	264
Tabelle 6.10	Auswahl bei der Auftragsfreigabe im Simulationsmodell	265
Tabelle 6.11	Auswahl der variablen Werten im Simulationsmodell	266
Tabelle 6.12	Veränderung der prozessbedingten Fertigungszeiten im Vergleich	269