

Sanjiv Surendra

**A Redesign with Particular
Focus on Human Factors in the
Automotive Development Process**

A Redesign with Particular Focus on Human Factors in the Automotive Development Process

**Eine Neugestaltung unter besonderer Berücksichtigung von humanen
Faktoren im Fahrzeugentstehungsprozess**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen
Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen
Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Sanjiv Surendra

Berichter: Außerplanmäßige Professorin Dr. phil. Ingrid Isenhardt
Universitätsprofessor Dr.-Ing. Achim Kampker

Tag der mündlichen Prüfung: 09. Juli 2021

Berichte aus dem Maschinenbau

Sanjiv Surendra

**A Redesign with Particular Focus on Human Factors
in the Automotive Development Process**

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2021)

Copyright Shaker Verlag 2021

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8179-4

ISSN 0945-0874

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

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung „Strategische Ausrichtung und Steuerungsmodell Mercedes-Benz Operations (MO)“ bei der Daimler AG und in Zusammenarbeit mit dem Cybernetics Lab IMA & IfU der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Die Qualität und das Gelingen einer solchen Arbeit hängen im hohen Maße von den fachlichen Diskussionen mit und der Motivation durch Kollegen, Freunde und der Familie ab. Ich möchte mich bei all jenen herzlich bedanken, die ihren Anteil an dieser Arbeit haben.

Zunächst gilt dieser Dank Frau Prof. Dr. phil. Ingrid Isenhardt, die diese Arbeit mit großem Engagement sowie Vertrauen in mich und meinem Forschungsthema betreut hat. Herzlichst danke ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker für die Übernahme des Koreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Corves für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

In besonderer Weise möchte ich mich bei Herrn Dr. rer. nat. Frank Hees für die intensive Betreuung, fachlichen Diskussionen, kreativen Denkanstöße sowie persönliche Unterstützung beim Erreichen der vielen Zwischenetappen bedanken. Seine Erfahrung aus vielen Industrieprojekten hat maßgeblich dazu beigetragen, um in diesem Forschungsvorhaben Wissenschaft und Industrie erfolgreich zu vereinen. Ebenso bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. rer. nat. René Vossen für seinen engagierten Einsatz bei der Entstehung des gemeinsamen Forschungsprojekts, Vertrauen in meine Person, für seine Weitsicht, Freundschaft und fortwährende moralische Unterstützung. Ich danke auch Frau Dr. rer. nat. Sarah Müller-Abdelrazeq und Herrn Dr.-Ing. Jan Bitter-Krahe, die mir während der Finalisierung dieser Arbeit mit Rat und Tat zur Seite standen. Allen Mitarbeiter:innen vom Cybernetics Lab IMA & IfU danke ich für die herzliche Aufnahme und entgegengebrachte Hilfsbereitschaft.

Mein aufrichtiger Dank gilt dem Bereich „Mercedes-Benz Operations (MO)“ der Daimler AG für das große Engagement an der Entwicklung des Forschungsvorhabens, dem Interesse an Forschung und der dauerhaften Unterstützung – auch in unsicheren Zeiten bedingt durch die COVID-19 Pandemie. Danken möchte ich an dieser Stelle Karlheinz Fischer für seinen unermüdlichen Einsatz in der MO sowie Herrn Christoph Wenzel für die fachlichen Diskussionen, entgegengebrachte Hilfsbereitschaft und moralischen Unterstützung in den entscheidenden Phasen dieser Arbeit.

Ein tiefer Dank gilt der Familie: meinen Eltern Rudra und Sumathi Surendra sowie meinem Bruder Rajiv Surendra. Danke für die Werte, die sie mir mitgegeben haben und die vielen spannenden Möglichkeiten, die sie mir auf meinen persönlichen Lebensweg bereitet haben.

Der allerwichtigste Dank gilt meiner Freundin Marina Mayer für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und Inspirationen, Verzicht auf gemeinsame Zeit, Geduld, Zuspruch und schönen Momente abseits der Anfertigung dieser Arbeit.

Stuttgart, Juli 2021

Sanjiv Surendra

Abstract

The automotive industry is undergoing a structural transformation driven by global megatrends, which leaves its mark: sales are down in many markets, while revenue and profitability are suffering from huge investments in electrification, digitalization, and autonomous driving. In those competitive markets, the customers' preference for higher product variety as a result of rapid technological advances will require an ever-increasing production flexibility. To achieve this, humans can play a decisive role. It is expected that next to product characteristics, effects of megatrends will significantly influence the humans and their industrial workplaces: For example, human work tasks will be more complex and will require new worker skills, a closer human-robot collaboration, and the production of electric vehicles. In addition, the demographic change will lead to a strongly decreasing and ageing workforce, which correlates with the increase of physical disabilities.

These tremendous trends and challenges call for a paradigm shift: As humans are deemed a decisive production factor, they need to be in the center when it comes to production planning. This means that an approach is required to proactively develop future production-related competences and design attractive workplaces, which are aligned to the physical abilities as well as to the individual and social needs of the workforce. The automotive development process is suitable to address those challenges early and proactively. It represents an efficient process with clear milestones and phases. Further, it is aligned with the language and tools of the engineers from different disciplines and departments. However, the current automotive development process cannot be deemed human-centered, as human factors are poorly considered.

Therefore, the aim of this thesis is to redesign the automotive development process towards a more proactive approach, which particularly considers human factors. In order to introduce this paradigm shift, multi-perspective requirements are derived from different scientific and industrial studies considering effects of megatrends, such as demographic change and digitalization on humans in production environment. Besides, the automotive development process is redesigned to guide specific actions and decisions for the proactive consideration of human factors. Afterwards, the redesign concept of this work is validated in use cases to confirm the implementation in practical use. Finally, the findings from the use cases are critically evaluated and relevant conditions discussed, in order to transfer the redesign concept to other industries. The result of the thesis is a procedure derived from science for the practical use in the automotive manufacturing of tomorrow.

Kurzfassung

Die Automobilindustrie befindet sich aufgrund globaler Megatrends in einer strukturellen Transformation, welche Spuren hinterlässt: In vielen Märkten ist der Absatz rückläufig, der Umsatz und die Profitabilität leiden unter den enormen Investitionen in Elektrifizierung, Digitalisierung und autonomes Fahren. In diesen wettbewerbsintensiven Märkten wird der Kundenwunsch nach höherer Produktvielfalt infolge von rasanten technologischen Fortschritten eine immer höhere Flexibilität der Produktion erfordern. Um dies sicherzustellen, kann der Mitarbeiter in der Produktion eine entscheidende Rolle spielen. Es ist zu erwarten, dass die Megatrends neben neuen Produktfeatures auch den Mitarbeiter in der Produktion und seinen Industriearbeitsplatz maßgeblich beeinflussen werden: Beispielsweise werden die Arbeitsaufgaben komplexer und es werden neue Fähigkeiten benötigt, um mit der zunehmenden Produkt- und Prozesskomplexität umzugehen, enger mit hochintelligenten Robotern zusammenzuarbeiten und Elektrofahrzeuge zu produzieren. Darüber hinaus wird der demografische Wandel zu einer stark abnehmenden und alternden Belegschaft führen, welches zugleich mit der Zunahme von körperlichen Beeinträchtigungen korreliert.

Diese gewaltigen Trends und Herausforderungen erfordern einen Paradigmenwechsel: Da der Mensch als entscheidender Produktionsfaktor gilt, muss er auch im Mittelpunkt der Produktionsplanung stehen. Hierzu bedarf es daher eines Ansatzes, um zukünftige produktionsbezogene Kompetenzen proaktiv zu entwickeln und attraktive Arbeitsplätze zu gestalten, welcher sowohl auf die körperlichen Fähigkeiten als auch auf die individuellen und sozialen Bedürfnisse der Belegschaft eingeht. Der Fahrzeugentstehungsprozess gilt hierfür als besonders geeignet, um diese Herausforderungen frühzeitig und proaktiv anzugehen, da er klare Meilensteine und Phasen aufweist. Zudem ist er optimal in der Automobilindustrie verankert und bei den Ingenieuren der verschiedenen Fachabteilungen aufgrund seiner Klarheit akzeptiert. Der derzeitige Fahrzeugentstehungsprozess kann allerdings nicht wirklich als humanzentriert bezeichnet werden, da die Herausforderungen des Mitarbeiters in der Produktion – in dieser Arbeit unter dem Begriff „Human Factors“ zusammengefasst – nahezu gar keine Rolle spielen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es daher, den Fahrzeugentstehungsprozess in Richtung eines proaktiven Ansatzes nezugestalten, der insbesondere die humanen Faktoren berücksichtigt. Um diesen Paradigmenwechsel einzuleiten, werden zunächst multiperspektivische Anforderungen aus verschiedenen wissenschaftlichen und industriellen Studien abgeleitet, um die Auswirkungen von Megatrends wie beispielsweise dem demografischen Wandel und der Digitalisierung zu berücksichtigen. Außerdem wird der Fahrzeugentstehungsprozess neugestaltet, um spezifische Handlungen und Entscheidungen für die proaktive Berücksichtigung von humanen Faktoren anzuleiten. Im Anschluss wird der neugestaltete Prozess in der Praxis anhand von Anwendungsfällen validiert. Abschließend werden die Erkenntnisse aus den Anwendungsfällen kritisch bewertet und Kriterien für den Transfer des neuen Fahrzeugentstehungsprozesses auf andere Industrien diskutiert. Das Ergebnis der Arbeit ist eine aus der Wissenschaft abgeleitete Vorgehensweise für den praktischen Einsatz in der Automobilproduktion der Zukunft.

TABLE OF CONTENTS

LIST OF FIGURES.....	vi
LIST OF TABLES	viii
1. Introduction	1
1.1 Statement of the Problem and Aim of the Work	1
1.2 Procedure and Structure of the Work	3
2. Theoretical Foundations: The Scope of Considerations.....	5
2.1 Overview	5
2.2 Characteristics of the Automotive Manufacturing	5
2.2.1 Plant Structure of the Automotive Manufacturing	6
2.2.2 Assembly Processes	7
2.2.3 Assembly Technologies	9
2.2.4 Job Groups in the Automotive Assembly.....	12
2.2.5 Conclusion.....	13
2.3 The Role of Humans in the Manufacturing.....	13
2.3.1 Development of the Human Image in Manufacturing Environment	13
2.3.2 Humans as a Production Factor	16
2.3.3 Conclusion.....	23
2.4 Effects of Megatrends on the Automotive Manufacturing.....	23
2.4.1 Scenarios of Future Developments in the Automotive Manufacturing.....	23
2.4.2 Global Megatrends on the Automotive Manufacturing.....	26
2.4.3 Impact of Global Megatrends on the Automotive Manufacturing	29
2.4.4 Conclusion.....	32
2.5 Summary of the Scope of Considerations	33
3. Theoretical Foundations: The Design Area.....	35
3.1 Overview	35
3.2 Methodology of the Product Development Process	35
3.2.1 Basic Terminologies.....	35
3.2.2 Evolution	37
3.2.3 Characteristics and Performance Drivers of the Product Development	38
3.2.4 Categorization Schemes of Approaches to Product Development.....	41

3.3	Methodology of the Automotive Development Process	42
3.3.1	Stage-Gate Process	42
3.3.2	State-of-the-art Automotive Development Process.....	44
3.4	Summary of the Design Area	48
3.5	Derivation of Research Questions.....	49
4.	Multi-Perspective Requirements for a Redesign with Focus on Human Factors.....	52
4.1	Overview and Methodological Framework.....	52
4.2	Study A: Future Assembler Competences.....	56
4.2.1	Literature Review on Future Assembler Competences	56
4.2.2	Survey on Future Assembler Competences.....	61
4.3	Study B: Effects of Digitalization on Employment.....	66
4.3.1	Information on the Industrial Project	66
4.3.2	Study Results and Discussion	67
4.4	Study C: Effects of Demographic Change on Employment.....	71
4.4.1	Information on the Industrial Project	71
4.4.2	Study Results and Discussion	73
4.5	Summary of the Chapter and Derivation of Requirements	80
5.	Redesign of the Automotive Development Process with Focus on Human Factors.....	84
5.1	Overview and Methodological Framework.....	84
5.2	Results of the Status Analysis	90
5.2.1	Product Design	90
5.2.2	Process and Workstation design.....	94
5.2.3	Management of Human Resources.....	99
5.2.4	Frame of Project Design.....	104
5.2.5	Summary of the Results of the Status Analysis	106
5.3	Results of the Human-Centered Redesign.....	110
5.3.1	Product Design	110
5.3.2	Process and Workstation Design.....	113
5.3.3	Management of Human Resources.....	116
5.3.4	Frame of Project Design.....	119
5.3.5	Summary of the Results of the Human-Centered Redesign.....	121

6.	Use Case.....	123
6.1	Overview and Characteristics of the Use Cases.....	123
6.2	Use Case 1: New Vehicle Development	124
6.2.1	Project-related characteristics.....	124
6.2.2	Measure: Round Table	125
6.2.3	Measure: Physical Ergonomics Vehicle.....	129
6.2.4	Measure: Ergonomic Target Figure	132
6.2.5	Measure: Capability-appropriate Job Match	133
6.2.6	Measure: Management of Future Workforce	137
6.2.7	Summary of Use Case 1	141
6.3	Use Case 2: New Battery Development.....	143
6.3.1	Project-related Characteristics.....	143
6.3.2	Measure: Round Table	144
6.3.3	Measure: Management of Future Workforce	145
6.3.4	Measure: Capability-appropriate Job Match	147
6.3.5	Summary of Use Case 2	148
7.	Critical Appraisal, Transferability & Outlook	151
8.	Summary of the Thesis.....	159
9.	Appendix.....	160
9.1	Information about the Manufacturer “PREMIUM AG”	160
9.2	Engineering Tools for the Manufacturing Design Process.....	160
9.3	PRISMA Flowchart to the Systematic Literature Review	162
9.4	Survey Extract (Study A).....	162
9.5	Exemplary Rating Scale for Demographic Criterion (Study C).....	163
	Publication bibliography	164

LIST OF FIGURES

Figure 1-1: Structure of the thesis and assignment of the research questions (RQ).....	4
Figure 2-1: Plant structure of the automotive manufacturing	7
Figure 2-2: Exemplary assembly line for conventional powertrain	8
Figure 2-3: Principles for the design of assembly systems	9
Figure 2-4: Development of the human image referred to theories of organization development... ..	15
Figure 2-5: Chances and costs of product redesign along the development process	19
Figure 2-6: Model illustrating influence of human factors (HF) on system performance	20
Figure 2-7: Characteristics of a reference scenario for the future automotive manufacturing	26
Figure 2-8: Identification of global megatrends influencing the automotive manufacturing.....	28
Figure 3-1: Schematic illustration of the innovation process.....	36
Figure 3-2: Vehicle lifecycle.....	37
Figure 3-3: Performance drivers (PD) of the product development process.....	40
Figure 3-4: Stage-gate process by Cooper	44
Figure 3-5: Typical state-of-the-art automotive development process.....	45
Figure 4-1: Schematic methodology to answer the RQ1	55
Figure 4-2: Results of the literature review regarding future assembler competences	60
Figure 4-3: Shift of need for job groups due to digitalization effects	69
Figure 4-4: Prioritization of demography relevant criteria after the concept rollout	74
Figure 4-5: Derivation of requirements (R) regarding a human-centered development process	81
Figure 5-1: Methodological framework to answer RQ2 and RQ3	85
Figure 5-2: Categorization of requirements after the systematic of manufacturing design process	87
Figure 5-3: Automotive development process with actions on ergonomic product design	92
Figure 5-4: Automotive development process with actions on process and workstation design	96
Figure 5-5: Automotive development process with actions on management of human resources	101
Figure 5-6: Status analysis of the automotive development process.....	107
Figure 5-7: Redesign of development process by actions on product design	112
Figure 5-8: Redesign of development process by actions on process and workstation design	115
Figure 5-9: Redesign of development process by actions on management of human resources	118
Figure 5-10: Redesign of development process by actions on the frame of project design	120
Figure 5-11: Contribution of measures to the requirements for a human-centered redesign	122
Figure 6-1: Results from the implementation of physical ergonomics vehicle.....	130
Figure 6-2: Distribution between product and process and workstation ergonomics	130
Figure 6-3: Workforce analysis of the age structure and fluctuation until 2028	138
Figure 6-4: Paths to qualify reworker with electric and electronics competences	140
Figure 6-5: Implementation plan of the human-centered development process in use case 1	142
Figure 6-6: Contribution of measures in use case 1 to a human-centered development process	143
Figure 6-7: Constructional redesign of an assembly workstation	148
Figure 6-8: Implementation plan of the human-centered development process in use case 2	149

Figure 6-9: Contribution of measures in use case 2 to a human-centered development process ... 150

Figure 7-1: Methodological research design used in this work..... 158

Figure 9-1: The PRISMA flowchart after Moher et al. (2009) to the systematic literature review 162

Figure 9-2: Survey extract on the influence of electric vehicle production on competences..... 162

Figure 9-3: Exemplary scale of the criterion “generation-specific trainings and seminars” 163

LIST OF TABLES

Table 2-1: Overview of current technologies in the automotive assembly system	9
Table 2-2: Set of keywords used in the literature review	27
Table 2-3: Effects of megatrends on the work environment of automotive manufacturing.....	32
Table 3-1: Dimension of categorization regarding product development approaches	41
Table 3-2: Categorization of product development approaches according to Wynn and Clarkson .	42
Table 4-1: Main characteristics of author's studies to answer the RQ1	54
Table 4-2: Group of keywords used in the systematic literature review	56
Table 4-3: Set of future assembler competences for automotive manufacturing.....	59
Table 4-4: Personal and professional-related characteristics of the survey respondents	62
Table 4-5: Descriptive statistics regarding the influence of effects on competences.....	64
Table 4-6: Statistically significant differences between business functions to validate H2.....	65
Table 4-7: Statistically significant differences between perspectives to validate H2	66
Table 4-8: Changes in requirements for relevant job profiles in the automotive assembly	68
Table 4-9: Recommendations for actions to face digital challenges in the organization	71
Table 4-10: List of demography relevant criteria for the concept of demography management	72
Table 5-1: Categorization of requirements for a human-centered development process	87
Table 5-2: Professional-related characteristics of the experts for the redesign.....	88
Table 5-3: Scale of the level of fulfillment of the requirements	89
Table 5-4: Assessment of the requirements for product design	94
Table 5-5: Assessment of the requirements for process and workstation design.....	99
Table 5-6: Assessment of the requirements for management of human resources	103
Table 5-7: Assessment of the requirements for frame of project design.....	105
Table 5-8: Assessment results of the requirements for a human-centered development process ..	109
Table 6-1: Overview of criteria for the selection of the use cases	123
Table 6-2: Overview of the implemented measures in the course of the use cases	124
Table 6-3: Departmental composition of the cross-functional team	125
Table 6-4: Results of the kickoff meeting as start of the concept "Round Table"	127
Table 6-5: The three main topics of the Round Table.....	128
Table 6-6: Examples of ergonomically critical assembly tasks and approaches to improvements	131
Table 6-7: Excerpt from the capability profile in the category "postures"	134
Table 6-8: Derived criteria of capability-appropriate workstation design	134
Table 6-9: Integration of capability-appropriate criteria in ergonomics assessment sheet	135
Table 6-10: Overview of assembly workstations fulfilling capability-appropriate criteria	135
Table 6-11: Simplified example of the manual job match process	136
Table 6-12: Overview of some relevant job profiles for the future vehicle project.....	139
Table 6-13: Departmental composition of the cross-functional team	144
Table 6-14: Departmental overview of employees in the powertrain division	146
Table 9-1: Overview of current engineering tools for workplace design.....	160

LIST OF ABBREVIATIONS

AGV	<i>Automated guided vehicle</i>
ANOVA	<i>Analysis of variance</i>
AR	<i>Augmented reality</i>
BEV	<i>Battery electric vehicle</i>
Ch	<i>Characteristics</i>
CPS	<i>Cyber-physical system</i>
CSR	<i>Corporate social responsibility</i>
DMU	<i>Digital assembly mock-up</i>
DQR	<i>Deutsche Qualifikationsrahmen</i>
DTS	<i>Driveless transport system</i>
EOP	<i>End of production</i>
ERP	<i>Enterprise resource planning</i>
FCEV	<i>Fuel-cell electric vehicle</i>
FIFO	<i>First in first out</i>
H	<i>Human</i>
HFE	<i>Human factors and ergonomics</i>
HTO-model	<i>Human-Technology-Organization model</i>
IEA	<i>International Ergonomics Association</i>
IoT	<i>Internet of Thing</i>
IPV	<i>Interdisciplinary production preparation</i>
KPI	<i>Key performance indicator</i>
M	<i>Mean</i>
MMAL	<i>Manual mixed-model assembly line</i>
MSD	<i>Musculoskeletal disorders</i>
O	<i>Organization</i>
PD	<i>Performance Driver</i>
PDP	<i>Product development process</i>
PHEV	<i>Plug-in hybrid electric vehicle</i>

PPG	<i>Production-oriented product design</i>
PRISMA	<i>Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses</i>
REEV	<i>Range extender vehicle</i>
RFID	<i>Radio-frequency identification</i>
RQ	<i>Research question</i>
s^2	<i>Variance</i>
SOP	<i>Start of production</i>
SPSS	<i>Statistical package for the social science</i>
T	<i>Technology</i>
Total M	<i>Total Mean</i>
Total s^2	<i>Total Variance</i>
TPS	<i>Toyota Production System</i>
VR	<i>Virtual reality</i>

Notes on Gender Formulations

For reasons of better readability, the simultaneous use of masculine and feminine forms of speech has been dispensed with. All personal designations apply equally to any gender.