

# Systematische Auslegung von Karosseriekonzepten hinsichtlich minimaler Umweltwirkungen in einer frühen Konzeptphase

---

# **AutoUni – Schriftenreihe**

Band 157

**Reihe herausgegeben von**

Volkswagen Aktiengesellschaft, AutoUni, Volkswagen Aktiengesellschaft,  
Wolfsburg, Deutschland

Volkswagen bietet Wissenschaftlern und Promovierenden der Volkswagen AG die Möglichkeit, ihre Forschungsergebnisse in Form von Monographien und Dissertationen im Rahmen der „AutoUni Schriftenreihe“ kostenfrei zu veröffentlichen. Die „AutoUni Schriftenreihe“ ist eine Schriftenreihe der Volkswagen Group Academy, in der Dissertationen aus dem Volkswagen Doktorandenprogramm veröffentlicht werden. Über die Veröffentlichung in der Schriftenreihe werden die Resultate nicht für alle Konzernangehörigen, sondern auch für die Öffentlichkeit zugänglich.

Volkswagen offers scientists and PhD students of Volkswagen AG the opportunity to publish their scientific results as monographs or doctor's theses within the "AutoUni Schriftenreihe" free of cost. "AutoUni Schriftenreihe" is a series from Volkswagen Group Academy, in the dissertations from the Volkswagen doctoral program are published. The publication within the "AutoUni Schriftenreihe" makes the results accessible to all Volkswagen Group members as well as to the public.

Reihe herausgegeben von / Edited by  
Volkswagen Aktiengesellschaft  
Brieffach 1358  
D-38436 Wolfsburg

„Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse der im Rahmen der „AutoUni Schriftenreihe“ veröffentlichten Dissertationen sind allein die der Doktorand\*innen.“

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/15136>

---

Lars Reimer

Systematische  
Auslegung von  
Karosseriekonzepten  
hinsichtlich minimaler  
Umweltwirkungen  
in einer frühen  
Konzeptphase

 Springer Vieweg

Lars Reimer  
Wolfsburg, Deutschland

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2021

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse der im Rahmen der AutoUni – Schriftenreihe veröffentlichten Doktorarbeiten sind allein die der Doktorandinnen und Doktoranden.

ISSN 1867-3635

ISSN 2512-1154 (electronic)

AutoUni – Schriftenreihe

ISBN 978-3-658-35567-8

ISBN 978-3-658-35568-5 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-35568-5>

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

---

# Danksagung

Die vorliegende Doktorarbeit ist Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand innerhalb der Group Innovation (ehemals Konzernforschung) der Volkswagen AG und in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Konstruktionstechnik und dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik sowie Nachhaltige Produktion und Life Cycle Engineering entstanden. Die dadurch entstandenen Konferenzbeiträge und Veröffentlichungen [REI18a, REI18b, REI19, REI20a, REI20b, REI20c] fließen in diese Doktorarbeit mit ein.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit. Die zahlreichen Diskussionen und die konstruktive Kritik haben mir sehr bei der Bearbeitung geholfen. Zudem möchte ich all den Mitarbeitern des Instituts für Konstruktionstechnik und des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik sowie Nachhaltige Produktion und Life Cycle Engineering danken. Insbesondere gilt dieser Dank Felipe Cerdas und Alexander Kaluza, mit denen ich während meiner Promotionszeit intensiv zusammenarbeiten durfte.

Seitens der Volkswagen AG möchte ich meinen internen Vorgesetzten für die Ermöglichung der Doktorarbeit sowie meinen fachlichen Betreuern und Kollegen für die Unterstützung bei der Bearbeitung der Dissertation danken. Dabei möchte ich vor allem meine Betreuer hervorheben, die mit zahlreichen kritischen Anregungen und Hilfestellungen maßgeblich zu den Ergebnissen der vorliegenden Doktorarbeit beigetragen haben. Ein besonderer Dank gilt zudem all den Doktoranden, die sich während meiner Doktorandenzeit im Doktorandenkolleg engagiert haben und mir als Diskussions- und Sparringspartner dienten.

Weiterhin möchte ich meinen Praktikanten Martin Hühn, Yannick Schuh, Yasamin Mirzaei, Aniket Kapse, Zihang Song, Sebastian Schmidt, Melanie Klisch,

Pavan Krishna Jois und Srideep Gupta danken, die ich im Rahmen meiner Doktorandenzeit betreuen durfte. Die resultierenden Bachelor- und Masterarbeiten [HUE18, SCH18, SCH19, GUP20, JOI20, KAP20] fließen ebenfalls in diese Doktorarbeit mit ein.

Mein letzter Dank gilt jedoch meiner Familie und meinen Freunden. Vielen Dank für die mir entgegengebrachte Geduld und Unterstützung. Vielen Dank für den Zuspruch und das Vertrauen.

Lars Reimer

---

## Kurzfassung

Während bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen die Nutzungsphase maßgeblich für die Umweltwirkungen im Lebenszyklus verantwortlich ist, verlagern sich die Umweltwirkungen im Lebenszyklus eines batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeuges in Abhängigkeit des Strommix für das Laden in die Produktionsphase. Folglich bedarf es neben Maßnahmen zur Reduktion der Umweltwirkungen in der Nutzungsphase ebenfalls Maßnahmen zu Optimierungen in der Produktionsphase. Neben der Batteriefertigung, die etwa 46 % der Treibhausgasemissionen in der Produktionsphase verursacht, zeigt auch die Fertigung der Karosserie mit etwa 26 % ein Potential zur Reduktion der Umweltwirkungen.

Daher wird eine Konstruktionsmethodik entwickelt, mit der Karosseriekonzepte hinsichtlich minimaler Umweltwirkungen und bei Gewährleistung ihrer Funktionalität und Fertigbarkeit sowie bei Berücksichtigung variierender Lebenszyklusszenarien ausgelegt werden können. Dabei soll die Methodik in der frühen Konzeptphase ansetzen, damit bereits in dieser Phase erste Trendaussagen ermöglicht werden, welches Karosseriekonzept, im Speziellen welches Werkstoff- und Fertigungskonzept minimale Umweltwirkungen aufweist. Infolgedessen können kostenintensive Änderungsschleifen infolge einer unzureichenden Umweltverträglichkeit im späteren Verlauf des Entwicklungsprozesses vermieden werden.

Die Konstruktionsmethodik kann in die drei Säulen „Randbedingungen“, „Optimierungsstrategie“ und „Lösungsfindung“ unterteilt werden. Zunächst sind die Randbedingungen der Konzeptauslegung und Umweltbewertung festzulegen. In Abhängigkeit der Randbedingungen werden im nächsten Schritt Konzeptentwürfe generiert. Dabei kann sowohl das Werkstoff- als auch das Fertigungskonzept variiert werden. Zur Gewährleistung der Funktionalität sowie Fertigbarkeit der Konzeptentwürfe wird zudem die Geometrie der Konzepte in dem gegebenen

Bauraum mit dem Ziel minimaler Umweltwirkungen optimiert. Als Ergebnis ergibt sich schließlich ein Konzeptentwurf mit minimalen Umweltwirkungen bei einer gegebenen Kombination aus Werkstoff und Fertigungsverfahren. Für jede weitere Kombination aus Werkstoff und Fertigungsverfahren ist die beschriebene Optimierungsstrategie ebenfalls zu durchlaufen, bis der Konzeptentwurf mit minimalen Umweltwirkungen identifiziert werden kann.

Abschließend wird die Konstruktionsmethodik anhand von Fallbeispielen validiert und exemplarisch auf ein Karosseriekonzept eines selbstfahrenden Fahrzeuges angewendet. Dabei werden sowohl heutige als auch zukünftige Lebenszyklusszenarien berücksichtigt.

---

## Abstract

For internal combustion engine vehicles, the use phase dominates the environmental impacts during the life cycle. In comparison, the environmental impacts in the life cycle of battery electric vehicles (BEV) highly depend on the electricity mix for charging and eventually shift into the production phase. Consequently and in addition to measures to reduce the environmental impact in the use phase, measures to optimize the production phase regarding minimal environmental impacts are also required. Besides the battery production, which causes approximately 46 % of the environmental impacts in the production phase, the production of the vehicle body with approximately 26 % offers a potential for the reduction of the life cycle environmental impacts of BEVs.

Therefore, a design methodology is developed with which body concepts can be designed with regard to minimal environmental impacts and with the guarantee of their functionality and manufacturability as well as with consideration of varying life cycle scenarios. The design methodology should start in the early concept phase. Due to that, first trend statements can be made, which body concept, in particular which material and production concept has minimal environmental impacts. As a result, costly design changes due to insufficient environmental compatibility can be avoided later in the product development process.

The design methodology can be divided into the three pillars “boundary conditions”, optimization strategy” and “solution finding”. First, the boundary conditions of the concept design and environmental assessment must be defined. Depending on the boundary conditions, concepts are generated in the next step. Both the material and the production concept can be varied. In order to ensure the functionality and manufacturability of the concepts, the geometry of the concepts in the given design space is also optimized with the aim of minimal environmental impacts. The result is a concept with minimal environmental impacts for a given

combination of material and manufacturing process. For each further combination of material and manufacturing process, the described optimization strategy must also be completed until the concept with minimal environmental impacts can be identified.

Finally, the design methodology is validated on the basis of case studies and applied exemplarily to a body concept of a self-driving vehicle. Both current and future life cycle scenarios are taken into account.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	1
1.1	Motivation .....	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise .....	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen zur Auslegung der Karosserie hinsichtlich minimaler Umweltwirkungen</b> .....	7
2.1	Grundlagen der Fahrzeugentwicklung .....	7
2.1.1	Produktentstehungsprozess .....	8
2.1.2	Konzeptentwicklung .....	14
2.2	Grundlagen der Umweltbewertung .....	21
2.2.1	Definitionen in der Umweltbewertung .....	21
2.2.2	Methoden zur Bewertung der Umweltwirkungen .....	24
2.3	Grundlagen des Life Cycle Engineerings und Life Cycle Designs .....	28
2.3.1	Ökologische Hotspots im automobilen Lebenszyklus ....	29
2.3.2	Maßnahmen zur Reduktion der Umweltwirkungen .....	31
<b>3</b>	<b>Stand der Forschung zur Auslegung der Karosserie hinsichtlich minimaler Umweltwirkungen</b> .....	35
3.1	Ansätze zur umweltverträglichen Auslegung der Karosseriestruktur .....	36
3.1.1	Ansatz auf Basis von Konstruktionsrichtlinien .....	36
3.1.2	Ansätze auf Basis subjektiv festgestellter Indikatoren ...	37
3.1.3	Ansätze auf Basis objektiv berechneter Kennwerte .....	40
3.2	Bewertung der hervorgebrachten Ansätze .....	45
3.2.1	Definition der Bewertungskriterien .....	45
3.2.2	Darstellung der Bewertungsergebnisse .....	47

3.3	Herleitung des Forschungsbedarfs .....	49
<b>4</b>	<b>Vorgehensmodell zum Life Cycle Design der Karosserie hinsichtlich minimaler Umweltwirkungen</b> .....	<b>53</b>
4.1	Prämissen .....	53
4.1.1	Zielsetzung .....	53
4.1.2	Anforderungsdefinition .....	54
4.2	Beschreibung des Vorgehensmodells .....	55
4.3	Randbedingungen .....	58
4.3.1	Marktspezifisch .....	58
4.3.2	Fahrzeugspezifisch .....	61
4.3.3	Baugruppenspezifisch .....	63
4.4	Optimierungsstrategie .....	66
4.4.1	Konzeptherleitung .....	67
4.4.2	Konzeptvalidierung .....	73
4.4.3	Konzeptbewertung .....	74
4.4.4	Konzeptauswahl .....	85
4.5	Lösungsfindung .....	86
<b>5</b>	<b>Exemplarische Anwendung des Vorgehensmodells anhand von Fallstudien</b> .....	<b>89</b>
5.1	Prämissen .....	89
5.1.1	Definition von Fallstudien .....	90
5.1.2	Definition von Lebenszyklusszenarien .....	90
5.1.3	Sensitivitätsanalyse zur Umweltbewertung .....	91
5.2	Auslegung von Fallstudien hinsichtlich minimaler Umweltwirkungen .....	95
5.2.1	Außen- und Innenteile .....	96
5.2.2	Strukturbauteile .....	98
5.3	Abschließende Potentialabschätzung .....	106
5.3.1	Treibhausgasemissionen im Lebenszyklus eines Elektrofahrzeuges .....	106
5.3.2	Einsparungspotential von Treibhausgasemissionen durch umweltgerecht ausgelegte Karosseriebauteile .....	108
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung, kritische Würdigung und Ausblick</b> .....	<b>113</b>
6.1	Zusammenfassung .....	113
6.2	Kritische Würdigung .....	115
6.3	Ausblick .....	118

---

<b>Anhang</b> .....	121
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	139

---

# Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

---

## Abkürzungen

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
Al	Aluminium
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAD	Computer-aided design
CADC	Common Artemis Driving Cycle
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CLI	Clinchen
CN	China
CPM	Characteristics-Properties Modelling
DE	Deutschland
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMC	Dough Moulding Compound
EN	Europäische Norm
EP	Epoxidharz
ERV	Energy reduction value
EU	European Union
EVA	Ethylen-Vinylacetat
FE	Finite Elemente
FEM	Finite-Element-Methode
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GUI	Graphical User Interface
HSN	Halbhohlstanznieten
ISO	International Organization for Standardization

---

KBE	Knowledge Based Engineering
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KN	Klimaneutral
K1K	Kleben mit Einkomponentenklebstoff
K2K	Kleben mit Zweikomponentenklebstoff
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Costing
LCD	Life Cycle Design
LCE	Life Cycle Engineering
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
LCSA	Life Cycle Sustainability Assessment
LSS	Laserstrahlschweißen
MaaS	Mobility as a Service
MSG	Metallschutzgasschweißen
MX	Mexiko
NVH	Noise, Vibration, Harshness
PC	Polycarbonate
PDD	Property-Driven Development
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
PET	Polyethylenterephthalat
PLA	Poly lactide
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PSO	Particle swarm optimization
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVC	Polyvinylchlorid
SAE	Society of Automotive Engineers
SgRP	Sitzreferenzpunkt
SLCA	Social Life Cycle Assessment
SMC	Sheet Molding Compound
SOP	Start of Production
St	Stahl
THG	Treibhausgas
UN	United Nations
UP	Ungesättigte Polyesterharze
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VE	Vinylesterharz

VSN	Vollstanznieten
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
WPS	Widerstandspunktschweißen

---

## Formelzeichen

$A$	Flächeninhalt der Querschnittsfläche
$a$	Normierter Flächeninhalt der Querschnittsfläche
$B$	Breite des Bauraums
$b$	Breite
$c$	Koeffizient zur Definition des geforderten Leichtbaupotentials
$E$	Elastizitätsmodul
$e_{ERV}$	Energiereduktionswert
$e_{Fzg.}$	Energieverbrauch eines Elektrofahrzeuges
$f$	Breite des Fügeflansches
$G$	Schubmodul
$H$	Höhe des Bauraums
$h$	Höhe
$I_T$	Torsionsträgheitsmoment
$I_y$	Flächenträgheitsmoment 2. Grades um die y-Achse
$i_y$	Norm. Flächenträgheitsmoment 2. Grades um die y-Achse
$K(x)$	Formfunktion der Biegelinie
$K_{Mat.}$	Werkstoffkennwert
$K_{Quer.}$	Geometrie-kennwert
$l$	Länge
$l_F$	Länge des Fügeflansches
$l_{LL}$	Laufleistung
$M$	Massebedarfskennwert
$M_{Kb.}$	Massebedarfskennwert eines Karosseriebauteils
$M_{Kb.,2}/M_{Kb.,1}$	Leichtbaupotential
$m$	Masse
$m_{Füg.}$	Masseinsatz für die Herstellung einer Fügeverbindung
$q_z(x)$	Funktion der Streckenlast in z-Richtung
$s_{DPw.}$	Sachbilanz für die Produktionsanlage (dynamischer Anteil)
$s_{Elek.}$	Sachbilanz für die Energiebereitstellung
$s_{Füg.}$	Sachbilanz für die Herstellung einer Fügeverbindung
$s_{Gw.}$	Sachbilanz zur Herstellung des Grundwerkstoffes
$s_{Ka.}$	Sachbilanz für den Karosseriebau