

ARENA 2036

Max Hoßfeld
Clemens Ackermann *Hrsg.*

Leichtbau durch Funktionsintegration

ARENA2036

 Springer Vieweg

ARENA2036

Reihe herausgegeben von
ARENA2036 e. V., Stuttgart, Deutschland

Die Buchreihe dokumentiert die Ergebnisse eines ambitionierten Forschungsprojektes im Automobilbau. Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer nachhaltigen Industrie 4.0 und die Realisierung eines Technologiewandels, der individuelle Mobilität mit niedrigem Energieverbrauch basierend auf neuartigen Produktionskonzepten realisiert. Den Schlüssel liefern wandlungsfähige Produktionsformen für den intelligenten, funktionsintegrierten, multimaterialen Leichtbau. Nachhaltigkeit, Sicherheit, Komfort, Individualität und Innovation werden als Einheit gedacht.

Wissenschaftler verschiedener Disziplinen arbeiten mit Experten und Entscheidungsträgern aus der Wirtschaft auf Augenhöhe zusammen. Gemeinsam arbeiten sie unter einem Dach und entwickeln das Automobil der Zukunft in der Industrie 4.0.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/16199>

Max Hoßfeld · Clemens Ackermann
(Hrsg.)

Leichtbau durch Funktionsintegration

Hrsg.
Max Hoßfeld
ARENA2036 e. V.
Stuttgart, Deutschland

Clemens Ackermann
ARENA2036 e. V.
Stuttgart, Deutschland

ISSN 2524-7247 ISSN 2524-7255 (electronic)
ARENA2036
ISBN 978-3-662-59822-1 ISBN 978-3-662-59823-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59823-8>

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

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020

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.

Verantwortlich im Verlag: Markus Braun

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Forschungscampus ARENA2036 (Verbundprojekt LeiFu, Förderkennzeichen 02PQ5000 bis 02PQ5005) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA-PFT) betreut.

Der Bericht stellt die Ergebnisse aus dem Verbundprojekt vor. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Kurzfassung

Leichtbau durch Funktionsintegration bietet als systemischer Ansatz großes Potenzial die Gewichtspirale im Fahrzeugbau zu durchbrechen und den heutigen Herausforderungen im Kontext des Klimawandels und globaler CO₂-Ziele, der Ressourceneffizienz und der Nachhaltigkeit zu begegnen. Dabei bieten insbesondere faserverstärkte Kunststoffe (FVK) aufgrund ihres spezifischen Aufbaus und ihrer Herstellungsprozesse – über die reine Gewichtsreduktion im Sinne des Werkstoffleichtbaus hinaus – hervorragende Möglichkeiten zur Integration zusätzlicher Funktionen. Dabei können Gewichtsreduktionspotenziale sowohl durch die direkte Integration von Funktionen in Strukturbauteile als auch durch die Erschließung sekundärer Leichtbaupotenziale realisiert werden. Die größte Herausforderung für die Funktionalisierung von FVK-Strukturbauteilen besteht in diesem Kontext derzeit in der effizienten, industriell umsetzbaren Integration von Funktionen in die Bauteile selbst und der parallelen Entwicklung prozesssicherer, automatisierter und wirtschaftlicher Fertigungsprozesse.

Das in dieser Veröffentlichung vorgestellte Projekt „LeiFu – Intelligenter Leichtbau durch Funktionsintegration“ hatte daher zum Ziel, auf Basis von Funktionsintegration neue Ansätze zum Durchbrechen der Gewichtspirale im Bereich Automobil zu schaffen und dabei die besonderen Potenziale von faserverstärkten Kunststoffen zu erschließen. Die Umsetzung erfolgt dabei im Hinblick auf die automobilen Großserie derart, dass durch die kostensparenden Effekte der Funktionsintegration etwaige Mehrkosten des Gesamtsystems durch den vergleichsweise teuren FVK-Einsatz möglichst vermieden werden.

Die Veröffentlichung zeichnet den Weg von der Ermittlung der Anforderungen an ein automobiles Realbauteil über die Entwicklung und Bewertung von Ansätzen zur Funktionalisierung hin zu Konzeptentwicklung und zur Umsetzungsphase nach. Hierfür werden zunächst Funktionalitäten entwickelt und deren Integrationsmöglichkeit anhand verschiedener Einzelfunktionsdemonstratoren nachgewiesen. In Teilaufbauten werden mechanische Funktionen (z. B. Crash, NVH), thermische Funktionen (z. B. Heizung, Isolation), sensorische Funktionen (z. B. Structural Health Monitoring, Detektion von Flüssigkeitsaustritt) sowie elektrische Funktionen (z. B. berührungsloses Laden)

integriert. Basierend auf Technologiebewertungen und funktionalen Tests werden diese in einem funktionsintegrierten Bodenmodul zusammengeführt.

Im Anschluss an die Integration der Einzeltechnologien in das Bodenmodul wurde dieses im Hinblick auf Funktion, Gewicht, Kosten und Herstellbarkeit weiter optimiert. Simultan erfolgten hierzu Optimierungen der Einzeltechnologien hinsichtlich des Gesamtsystems. Zentrale Punkte waren hierbei eine weitere Gewichtsreduzierung, eine Optimierung von Festigkeit und Steifigkeit im Hinblick auf das eingesetzte Werkstoffvolumen wie etwa durch gewichtsoptimale Waddickenverteilung und durch Lastpfadoptimierungen sowie die Faseroberflächenoptimierung.

Das Ergebnis von LeiFu sind erprobte, hochfunktionsintegrierte und großserientaugliche FVK-Leichtbaustrukturen. Im Vergleich zur funktional gleichwertigen Referenzstruktur mit 74 Teilen bei 113,2 kg Gesamtgewicht, kann der LeiFu-Boden eine signifikante Gewichts- und Teilezahlreduktion verzeichnen. Die finale Struktur wiegt 70,5 kg bei 28 Teilen. Dies entspricht einer Gewichtseinsparung von 38 % bei einer gleichzeitigen Reduzierung der Teilezahl von 62 %.

Inhaltsverzeichnis

1	Der Forschungscampus ARENA2036	1
	Max Hoßfeld und Clemens Ackermann	
2	Leichtbau durch Funktionsintegration	5
	Max Hoßfeld	
2.1	Das Projekt LeiFu	6
2.2	Aufbau, Vorgehen und Ergebnisse	8
3	Bewertung existierender Ansätze und neuer Ideen zur Funktionalisierung	13
	Stefan Zuleger	
3.1	Anforderungen an Bodenstruktur bzw. Bodenmodul	13
3.2	Ausarbeitung neuer Ideen und Integration in die Bewertungsmatrix	16
3.3	Bewertung und Priorisierung der Ansätze	17
4	Konzeptentwicklung für ein funktionsintegriertes Bodenmodul	21
	Sebastian Vohrer und Gundolf Kopp	
4.1	Konzeptphase	22
4.1.1	Analyse der Ist-Situation und Einzelanforderungen	22
4.1.2	Aufteilung in Teilsysteme	26
4.1.3	Erstellung von Lösungen zu Teilsystemen	28
4.1.3.1	Montagekonzept und Rohbauanbindung	28
4.1.3.2	Bauweise und Funktionsintegration	30
4.1.3.3	Fertigungskonzepte	39
4.1.4	Bewertung und Vorauswahl zur weiteren Detaillierung	39
4.1.4.1	Bewertung der Montagekonzepte	40
4.1.4.2	Bewertung der Aufbaukonzepte	42
4.2	Entwurfsphase mit Detailkonzeption von ausgewählten Bodenmodulen	45
4.2.1	Konzept-Detaillierung „Release-Stand 1“	46
4.2.2	Erstbewertung des Bodenkonzeptes („Release-Stand 1“)	49

4.2.2.1	Erstbewertung NVH	49
4.2.2.2	Voruntersuchung Crash	50
4.2.2.3	Materialkartenentwicklung PU-Schaum	54
4.2.2.4	Fertigung und Herstellbarkeit	56
4.2.2.5	LCA und Recycling – Umweltstudie	60
4.2.3	Konzept-Detaillierung „Release-Stand 2“	64
4.2.3.1	Mechanische Funktionen	65
4.2.3.2	Thermische Funktionen	68
4.2.3.3	Elektrische Funktionen	69
4.2.3.4	Sensorische Funktionen	70
4.2.3.5	Sonstige Funktionen	70
4.2.4	Crashuntersuchung im Gesamtfahrzeug	71
4.2.4.1	Ergebnisse Crashsimulation „Loop1“	72
4.2.4.2	Robustheitsanalyse	74
4.2.4.3	Konzeptanpassungen und Ergebnisse Crashsimulation „Loop 2“	75
4.2.5	Finalisierung Konzept („Release-Stand 3“) und Abschlussbewertung	78
4.2.5.1	Abschlussbewertung Gesamtfahrzeugsimulation Crash	79
4.2.5.2	Abschlussbewertung Gesamtfahrzeugsimulation NVH	83
4.2.5.3	Fazit Gesamtfahrzeugsimulation	84
4.3	Ergebnis Konzeptentwicklung („Release-Stand 3“)	85
	Literatur	88
5	Technologieentwicklung	91
	Karim Bharoun	
5.1	Crash-, Steifigkeits- und Festigkeitsoptimierung mittels Hybridtextilen, NVH-Optimierung	92
5.1.1	Lastpfadoptimiertes ORW-Gewebe	92
5.1.2	Drahtintegration	95
5.1.3	Flechten	97
5.1.4	Optimierte Faseroberfläche	99
5.2	Integriertes Wärmemanagement (Isolierung, Heizung, Kühlung)	103
5.2.1	Kühlung	103
5.2.2	Gedruckte aktive Heizfunktion	107
5.2.3	PU-Schäume	110
5.2.4	Falkernstrukturen	114
5.2.5	Kontaktierung im Serienprozess	115
5.3	Strukturintegrierte Schadens-/Crashsensorik	117
5.3.1	PVDF-Fasern	117

5.3.2	Gedruckte Sensoren am Beispiel der Flüssigkeitssensorik	119
5.3.3	Integration bestehender Automobilsensorik in CFK-Strukturen	121
5.3.4	Temperatursensorik	127
5.4	Induktives Laden	130
5.4.1	Anforderungen an die Technologie	130
5.4.2	Stand der Technik/Stand der Forschung	130
5.4.3	Detaillierte Ergebnisse Teiltechnologie	131
5.5	Integration Energiespeicher	137
5.5.1	Anforderungen an die Technologie	137
5.5.2	Stand der Technik/Stand der Forschung	137
5.5.3	Detaillierte Ergebnisse Teiltechnologie	138
5.6	Integrierte und flexible Tankblase	145
	Literatur	146
6	Demonstrator	147
	Daniel Michaelis	
6.1	Konzeptfestlegung und Konstruktion Demonstrator	147
6.1.1	Gesamtkonstruktion	148
6.1.2	Hauptbodenmodul	148
6.1.3	Heckbodenmodul	149
6.1.4	Multifunktions-Mulde	151
6.2	Aufbau Demonstrator	151
6.2.1	Fertigung der Komponenten	152
6.2.2	Montage der Komponenten	158
7	Funktionale Tests am Demonstrator	165
	Klaus Fürderer, Maximilian Hardt und Peter Middendorf	
7.1	Crashverhalten am Beispiel der Multifunktionsmulde	165
7.1.1	Simulation	166
7.1.2	Low-Speed-Crash-Versuche (LSC-Versuche)	168
7.1.3	Abgleich Ergebnisse LSC-Versuche zu Simulation	168
7.1.4	Fallturmversuche	170
7.1.5	Abgleich der Ergebnisse der Fallturmversuche mit der Simulation	170
7.2	NVH-Verhalten an einem Ausschnitt des Hauptbodens	173
7.3	Thermische Isolation bzw. Abstrahlung am Batteriemodul	179
7.4	Integrierte elektrische Funktionen am Beispiel des induktiven Ladens	181
7.4.1	Funktionale Tests und Bewertung	182
7.4.2	Kostenabschätzung	188

7.5	Integrierte elektrische Funktionen am Beispiel des Energiespeichers	189
7.5.1	Funktionale Tests und Bewertung	190
7.5.2	Kostenabschätzung.....	191
7.6	Sensorintegration im Technologieträger Multifunktionsmulde.....	192
7.6.1	Integrierte Funktionen und Technologien	192
7.6.2	Ergebnisse der ersten Entwicklungsstufe: Gen1 – kabelbasiert	196
7.6.3	Ergebnisse der zweiten Entwicklungsstufe: Gen2 – drahtlos	198
7.6.3.1	Einbettung und Fixierung der Sensorik im Schaumkern	199
7.6.3.2	Temperaturfestigkeit der elektrischen und sensorischen Komponenten	199
7.6.3.3	Einfluss des FVK auf die drahtlose Energie- und Datenübertragung	199
7.6.3.4	Integration in Rahmen des RTM-Serienprozesses	201
7.6.3.5	Betrieb der Sensormulden und Visualisierung der Daten.....	201
	Literatur.....	203
8	Kostenanalyse Gesamtbodenmodul.....	205
	Maximilian Hardt und Peter Middendorf	
8.1	Grundlagen der Kostenanalyse	205
8.2	Bauteildaten	207
8.3	Vorgehen Kostenanalyse	207
	Literatur.....	211

Herausgeber- und Autorenverzeichnis

Über die Herausgeber

Dr. Max Hoffeld ARENA2036 e. V., Stuttgart, Deutschland

Dr. Clemens Ackermann ARENA2036 e. V., Stuttgart, Deutschland

Autorenverzeichnis

Dr. Clemens Ackermann ARENA2036 e. V., Stuttgart, Deutschland

Dr. Karim Bharoun Robert Bosch GmbH (Bosch), Renningen, Deutschland

Dr. Klaus Fürderer Daimler AG, Böblingen, Deutschland

Maximilian Hardt Daimler AG, Böblingen, Deutschland

Dr. Max Hoffeld ARENA2036 e. V., Stuttgart, Deutschland

Gundolf Kopp Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart, Deutschland

Daniel Michaelis Institut für Flugzeugbau (IFB), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Prof. Peter Middendorf Institut für Flugzeugbau (IFB), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Sebastian Vohrer Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart, Deutschland

Stefan Zuleger Institut für Flugzeugbau (IFB), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
ARENA2036	Active Research Environment for the Next Generation of Automobiles
BEV	Battery Electric Vehicle
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAE	Computer-aided engineering
CAFAS	Carbonfaser-Sensorik
CAX	Computer-Aided x
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DigitPro	Ganzheitlicher Digitaler Prototyp für die Großserienproduktion
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.
FEM	Finite Element Methode
ForschFab	Forschungsfabrik: Produktion der Zukunft
FVK	Faserverbundkunststoffe
GMT	Glas-Matten-Thermoplaste
KHoch3	Kreativität – Kooperation – Kompetenztransfer
KTL	Kathodische Tauchlackierung
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LeiFu	Intelligenter Leichtbau durch Funktionsintegration
LFT	Langfaser-Thermoplaste
NVH	Noise, Vibration, Harshness
OEM	Original Equipment Manufacturer
ORW	Open Reed Weaving
PU/PUR	Polyurethan
PVDF	Polyvinylidenfluorid
RIM	Reaction Injection Moulding
RTM	Resin Transfer Molding
SMC	Sheet Mold Compound
TFP	Tailored Fiber Placement

TP	Teilprojekt
VAP	Vacuum Assisted Process
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion
VDA	Verband der Automobilindustrie

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	ARENA2036-Forschungsfabrik am Campus der Universität Stuttgart (Brigida Gonzáles)	2
Abb. 2.1	Die Ergebnisse des Projekts LeiFu bilden die Grundlage für weiterführende Forschungsarbeiten am Forschungscampus ARENA2036; u. a. im Verbundprojekt FlexCAR	6
Abb. 2.2	Projektstruktur LeiFu	8
Abb. 2.3	Integration der verschiedenen Einzeltechnologien im multifunktionalen PKW-Bodenmodul	12
Abb. 3.1	Umfang Bodenmodul	14
Abb. 3.2	Basisfahrzeug Mercedes S-Klasse Plug-In Hybrid	14
Abb. 3.3	Anforderungsbereiche Bodenmodul.	15
Abb. 3.4	Fokussierte Anforderungsbereiche	15
Abb. 3.5	Bewertungsmethodik der Ideen zur Funktionsintegration	17
Abb. 3.6	Stand der Technik Umfrage Projektpartner- Filterung der Ideen	18
Abb. 3.7	Auswertung der Ideen aus dem Stand der Technik	18
Abb. 3.8	Auswertung der neuen Ideen aus dem Konsortium	19
Abb. 4.1	Vorgehen Konzeptphase in Anlehnung an VDI2221	23
Abb. 4.2	Bodenstruktur und Übergangsstruktur als Rohbauschchnittstelle zwischen dem neu entwickelten LeiFu-Boden und der Benchmark Reststruktur (basierend auf Daten der Daimler AG)	24
Abb. 4.3	Fixpunkte und gesetzte Flächen (rot), Sitzanbindung und Rückwand auf Boden-Oberseite, Fahrwerksanbindung auf Boden-Unterseite (basierend auf Daten der Daimler AG)	25
Abb. 4.4	Package und Einbausituation relevanter Komponenten im Bodenbereich (basierend auf Daten der Daimler AG)	25
Abb. 4.5	Package, Funktions- und Einbausituation relevanter Komponenten im Bodenbereich (basierend auf Daten der Daimler AG)	26

Abb. 4.6	Methode der Aufgliederung und Verknüpfung zur Problem- und Systemstrukturierung (links) (in Anlehnung an VDI2221 (1993)) und Übersetzung auf die Projektzielstellung in LeiFu (rechts)	27
Abb. 4.7	Variantenbaum zu Montagereihenfolgen und resultierende Fügerichtungen	29
Abb. 4.8	Varianten zur seitlichen Rohbauanbindung der Sandwich-Bauweise	30
Abb. 4.9	Alternative Konzepte zur Rohbauanbindung mit Auflösung weiterer Montageeinheiten (Seitenwand)	31
Abb. 4.10	Differenzialbauweise, Integralbauweise und Funktionsintegration, eigene Darstellung nach Gumpinger et al. (2009)	31
Abb. 4.11	Einteilung verschiedener Kernstrukturen nach Friedrich (2017)	33
Abb. 4.12	Alternative Aufbaukonzepte und Kernwerkstoffe bzw. -geometrien	33
Abb. 4.13	Prinziplösungen zur Integration von Leitungen und Sensoren	34
Abb. 4.14	Package-Komponenten und Bauraum im Hauptbodenbereich (Auswahl) (basierend auf Daten der Daimler AG)	34
Abb. 4.15	Funktionsintegrationsmatrix für das Bodenmodul	36
Abb. 4.16	Konzeptskizzen zu identifizierten Funktionsintegrations-Potenzialen (1)	37
Abb. 4.17	Konzeptskizzen zu identifizierten Funktionsintegrations-Potenzialen (2)	38
Abb. 4.18	Zusammenführung Teilsysteme Grobkonzepte	39
Abb. 4.19	Herstellungswege monolithischer und Sandwich-Bauweisen	40
Abb. 4.20	Bewertungsbaum der Montagereihenfolge	40
Abb. 4.21	Gesamtbewertung und -gewichtung der Montagekonzeptvarianten (M) in Abhängigkeit der Zusammenbaureihenfolge	41
Abb. 4.22	Ergebnisse der Vordimensionierungen mittels Size-Optimierung	42
Abb. 4.23	Steifigkeitsverlauf für Biegung (oben) und Torsion (unten) für Konzeptvariante A3 (—) und des Referenzbodens (___)	43
Abb. 4.24	Gesamtbewertung und -gewichtung der Aufbaukonzepte (A)	44
Abb. 4.25	Vorgehen der Entwurfsphase	45
Abb. 4.26	Vergleich der Teilflächenresonanzen basierend auf FE-Simulationen an generischen Plattenelementen gleicher Masse, Sandwichelement mit 11 mm PUR-Kern mit $\rho_{\text{PUR}} = 100 \text{ kg/m}^3$	47
Abb. 4.27	Konzeptkonstruktion im „Release-Stand I“	47
Abb. 4.28	Angepasste Bauteile (Flanschlagen) der Referenzstruktur (basierend auf Daten der Daimler AG)	48

Abb. 4.29	Laminatdefinitionen und Wanddicken im „Release-Stand 1“	49
Abb. 4.30	Querschnitt Bodenmodul mit Luftkanal aus zwei Einzelkanälen	50
Abb. 4.31	Unterteilung des Bodenmoduls in Teilflächen	50
Abb. 4.32	Teilflächenresonanzen aus FE-Berechnungen	51
Abb. 4.33	Aufbau Ersatzlastfall und Belastungsrichtung	52
Abb. 4.34	Varianten zur Bewertung im Ersatzlastfall Boden PCT	52
Abb. 4.35	Druckversuch PU-Schaum 150 g/l vs. Simulation Rohacell® 110 g/l.	54
Abb. 4.36	Zugversuch PU-Schaum 150 g/l vs. Simulation Rohacell® 110 g/l.	55
Abb. 4.37	Schubversuch PU-Schaum 150 g/l vs. Simulation Rohacell® 110 g/l.	55
Abb. 4.38	Fertigungskonzept Sandwichstruktur „Skin-First“ mit reaktivem Ausschäumen.	57
Abb. 4.39	Hauptboden Drapierwinkel gemäß kinematischer Betrachtung	58
Abb. 4.40	Querträger Drapierwinkel gemäß kinematischer Betrachtung	58
Abb. 4.41	Rückbank Drapierwinkel gemäß kinematischer Betrachtung	59
Abb. 4.42	Spannungs-Dehnungs-Diagramm verschiedener Schäume bei 100 °C (links) und 120 °C (rechts)	59
Abb. 4.43	Umweltauswirkungen bei 0,3 l Kraftstoffersparnis pro 100 kg Gewichtersparnis und 100 km	62
Abb. 4.44	Klimaänderung – „Break-Even-Point“ (0,3 l/100 km/100 kg)	62
Abb. 4.45	Umweltauswirkungen bei 0,1 l/100 km/100 kg	63
Abb. 4.46	Klimaänderung – „Break-Even-Point“ (0,1 l/100 km/100 kg)	64
Abb. 4.47	Vorgehen zur Auslegung von Faserverbundstrukturen mit lokalen Lastpfadverstärkungen (Vohrer et al. 2017)	67
Abb. 4.48	Potenzial zur Gewichtseinsparung durch Lastpfadverstärkung (Vohrer et al. 2017)	67
Abb. 4.49	Ergebnisse der Crashsimulation Pfahl in „Loop 1“	72
Abb. 4.50	Ergebnisse der Crashsimulation Front 25 % in „Loop 1“	73
Abb. 4.51	Intrusionswerte der Crashsimulation Front 25 % in „Loop 1“	73
Abb. 4.52	Ergebnisse der Crashsimulation Heck in „Loop 1“	74
Abb. 4.53	Temperaturplots der Robustheitsanalyse	74
Abb. 4.54	Anpassung Sitzquerträger für Crashsimulation „Loop 2“	75
Abb. 4.55	Anpassung Geometrie hinterer Sitzquerträger für Crashsimulation „Loop 2“	75
Abb. 4.56	Verstärkungsblech an Tunnelinnenseite für Crashsimulation „Loop 2“	76
Abb. 4.57	Lagenaufbau der Bodendecklagen für Crashsimulation „Loop 2“	76
Abb. 4.58	Auswertepunkte und Intrusionswege der Crashsimulation Pfahl in „Loop 2“	77

Abb. 4.59	Ergebnisse der Crashesimulation Pfahl in „Loop 2“	77
Abb. 4.60	Ergebnisse der Crashesimulation Front 25 % in „Loop 2“	78
Abb. 4.61	Intrusionswerte der Crashesimulation Front 25 % in „Loop 2“	78
Abb. 4.62	Lagenaufbau der Bodendecklagen für Crashesimulation „Loop 3“	79
Abb. 4.63	Lagenaufbau der Sitzquerträger für Crashesimulation „Loop 3“	79
Abb. 4.64	Auswertepunkte der Crashesimulation Pfahl in „Loop 3“	80
Abb. 4.65	Ergebnisse der Crashesimulation Pfahl in „Loop 3“	80
Abb. 4.66	Auswertepunkte der Crashesimulation seitliche Barriere in „Loop 3“	81
Abb. 4.67	Ergebnisse der Crashesimulation seitliche Barriere in „Loop 3“	81
Abb. 4.68	Ergebnisse der Crashesimulation Front 100 % in „Loop 3“	82
Abb. 4.69	Ergebnisse der Crashesimulation Front 40 % in „Loop 2“	82
Abb. 4.70	Ergebnisse der Crashesimulation Front 25 % in „Loop 3“	82
Abb. 4.71	Intrusionswerte der Crashesimulation Front 25 % in „Loop 3“	83
Abb. 4.72	Ergebnisse der Crashesimulation Heck in „Loop 3“	84
Abb. 4.73	Ergebnisse der Eigenfrequenzuntersuchung des LeiFu-Bodens im Vergleich zur Referenz (Basis)	84
Abb. 4.74	Teilflächenresonanzen des LeiFu-Bodens mit Zielwert > 1200 Hz	85
Abb. 4.75	Explosionsansicht des Bodenmoduls im „Release-Stand 3“	86
Abb. 4.76	Übersicht finales Bodenkonzept und integrierter Funktionen gegenüber Referenzstruktur	86
Abb. 4.77	Gewichtsbilanzierung des LeiFu-Bodenmoduls nach Materialien im Release-Stand 3	87
Abb. 4.78	Gewichtsbilanzierung der FVK-Materialien des LeiFu-Bodenmodul im Release-Stand 3	87
Abb. 4.79	Gewichtsvergleiche des LeiFu-Konzeptes im Release-Stand 3 (RS3) zur Referenz	88
Abb. 5.1	Vom Faserzuschnitt zum fertigen Bauteil.	94
Abb. 5.2	Ergebnisse der Lastanalyse der Heckboden-Unterschale mit dem Ergebnis der Lastpfade nach Topologie-Optimierung (links), Prinzipverläufen der Lastpfade (Mitte) und Abwicklung der Bauteilfläche und Übertrag der Pfade (rechts)	94
Abb. 5.3	Prinzipskizze Versuchsaufbau	96
Abb. 5.4	Versuchsergebnisse Fallversuche	96
Abb. 5.5	Bruchbilder der verstärkten Varianten mit V2A-Draht (links) und verdrehten Stahllitzen (rechts)	97
Abb. 5.6	Umflochtener Flecht kern für eine Tunnelbrücke	98
Abb. 5.7	Additiv gefertigter „Liner“ eines Lüftungskanals (links). Dieser Liner dient als Flecht kern und verbleibt im fertigen Bauteil. Er ist hohl und kann nach Aufschneiden der benötigten Öffnungen das Kühl- und Heizmedium übertragen. Fertiges Bauteil mit den ausgesägten Zu- und Abluftöffnungen (rechts)	99

Abb. 5.8	Hydroxyethylmethacrylat (HEMA)	100
Abb. 5.9	Prinzipbild der Funktionsweise der HEMA-Lösung	100
Abb. 5.10	Teil der Anlage, an der die kontinuierliche Imprägnierung der Carbonfasern mit HEMA-Lösung durchgeführt wird. Im Vordergrund ist die Imprägnierung der Carbonfasern mit dem Acrylat zu sehen. Der Ofen zur Trocknung schließt sich direkt an und ist im Hintergrund zu sehen	101
Abb. 5.11	Die beschichteten und getrockneten Carbonfasern werden kontinuierlich einer Elektronenstrahlbehandlung unterzogen	102
Abb. 5.12	Flechtergebnis von Carbonfasern mit optimierter Faseroberfläche (IFB).	103
Abb. 5.13	Kühlplatte mit Einzelementen mit A Zu- und Ablaufelement, B Rücklaufelement und C montierte Kühlplatte	104
Abb. 5.14	Heizelement zur Nachbildung des Batteriemoduls	105
Abb. 5.15	Temperatur-Zeit-Diagramm zum Abkühlverhalten	105
Abb. 5.16	Weiterentwickeltes Kühlmodul mit Explosionsansicht (links) und montierte Kühlplatte (rechts).	106
Abb. 5.17	Aufbau für die Kühlleistungsprüfung mit Aufbau des Kühlmoduls mit „Aluminium Cans“, hier noch mit einem Kunststoffband zur temporären Fixierung (links) und dem Prüfaufbau zur Messung der Kühlleistung.	106
Abb. 5.18	Temperatur-Zeit-Diagramm zum Abkühlverhalten des weiterentwickelten Kühlmoduls.	107
Abb. 5.19	Lichtmikroskopische Aufnahme von Silberpartikeln in einem Glasfasergewebe mit Schichtdickenmessungen	108
Abb. 5.20	Heiztextil in Faserverbundplatte einlaminieren und mit prototypischer Kontaktierung mithilfe von selbstleitendem Kupferband versehen	109
Abb. 5.21	Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Zugversuche.	111
Abb. 5.22	Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Druckversuche.	111
Abb. 5.23	Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Scherversuche	112
Abb. 5.24	Spannungs-Dehnungs-Diagramm verschiedener Schäume bei 100 °C (links) und 120 °C (rechts).	112
Abb. 5.25	Schaumkerngeometrie für den Demonstrator (links) und „Skin-first“-Sandwich (rechts)	113
Abb. 5.26	CAD-Darstellung des Zusammenbaus des Faltekern-Kühlmoduls	115
Abb. 5.27	Fertiggestelltes Faltekern-Kühlmodul	115
Abb. 5.28	Prinzipaufbau der Technologieentwicklung zur Kontaktierung im Serienprozess.	116
Abb. 5.29	Messung der elektrischen Ladung einer unpolarisierten (links) und einer polarisierten PVDF-enhaltenden CFK-Platte	118

Abb. 5.30	Verlauf der interlaminaeren Scherfestigkeit nach DIN EN ISO 14130 über den Verformungsweg.	119
Abb. 5.31	Demonstrator einer Interdigitalstruktur aus Silber als Flüssigkeitssensor auf Glasfasergewebe.	120
Abb. 5.32	Feuchtigkeitssensoren in unterschiedlichen Größen	121
Abb. 5.33	Sensor (links), folienbasiertes Sensorsystem (Mitte) und Funktionsdemonstrator mit integriertem Sensorsystem (rechts).	122
Abb. 5.34	Werkzeug zur Sensorintegration in FVK-Platten im RTM-Prozess.	123
Abb. 5.35	Vergleich der Sensorintegration in den Prozessen VARI und RTM	123
Abb. 5.36	Zugfestigkeit integrierter Strukturen im Vergleich zwischen RTM und VARI (5 Probekörper je Versuchsreihe bzw. Typ, Prüfung nach EN ISO 527-4, Quelle: Robert Bosch GmbH)	124
Abb. 5.37	Zugfestigkeit integrierter Strukturen im Vergleich zur nicht funktionalisierten Bauteil (RTM, 5 Probekörper je Versuchsreihe bzw. Typ, Prüfung nach EN ISO 527-4, Quelle: Robert Bosch GmbH)	125
Abb. 5.38	Demonstrator „Sensorintegration“ mit optimierter Kontaktierung (GFK anstatt CFK zur Darstellung, Quelle: Robert Bosch GmbH). . . .	126
Abb. 5.39	Visualisierung der Messungen eines integrierten Sensorverbunds. . . .	126
Abb. 5.40	Transferbauteile für das erarbeitete Kontaktierungskonzept	127
Abb. 5.41	Leiterband mit SMD-Temperatursensor.	128
Abb. 5.42	Temperatursensor integriert in GFK-Platte und Datenlogger	128
Abb. 5.43	Messergebnisse Temperatur und Widerstand bei Verwendung von SMD-Sensoren	129
Abb. 5.44	Temperaturmessfaser (links) und Darstellung des Temperaturverlaufs über den normierten Widerstand (normiert bei 20 °C)	129
Abb. 5.45	Varianten der Bodenmodulanbindung „induktives Laden“	132
Abb. 5.46	Ergebnisse der Vorversuche zur Bauteilfertigung	133
Abb. 5.47	Bauteilkonzept Demonstrator „Induktives Laden“ (Gen.1, Quelle: Robert Bosch GmbH).	133
Abb. 5.48	Ergebnisse der Bauteilversuche Demonstrator (Gen.1)	134
Abb. 5.49	Fertigungskonzept „Induktives Laden“ (Gen.2, Quelle: Robert Bosch GmbH).	135
Abb. 5.50	Demonstrator (Gen.2) und Einbaulage Bodenmodul.	136
Abb. 5.51	Integrationskonzept „Energiespeicher“	139
Abb. 5.52	Bauteilkonzept Energiespeicher (Gen.1, Quelle: Robert Bosch GmbH).	140

Abb. 5.53	Fertigungskonzept Energiespeicher (Gen.1, Quelle: Robert Bosch GmbH)	141
Abb. 5.54	Bauteilkonzept Energiespeicher (Gen.2, Quelle: Robert Bosch GmbH)	141
Abb. 5.55	Fertigungskonzept Energiespeicher (Gen.2, Quelle: Robert Bosch GmbH)	142
Abb. 5.56	Montage der textilen Feuchtesensorik (Überwachung Kühlmediendichtigkeit, Quelle: ITCF)	142
Abb. 5.57	Anbindung des Batteriepacks an das Bodenmodul	143
Abb. 5.58	Aufnahmepunkte Batterierahmen und Batteriedeckel im Bodenmodul	143
Abb. 5.59	Anbindung des Batteriepacks mittels Schwingungsdämpfer	144
Abb. 5.60	Kontaktier- und Leitungskonzepte (Links: Kühlmedium, Rechts: Elektrischer Strom, Quelle: Robert Bosch GmbH)	144
Abb. 5.61	Demonstrator Energiespeicher (Gen.2) in Einbaulage.	145
Abb. 6.1	Die beiden Baugruppen „Hauptboden“ und „Heckboden“ des Demonstrators; dargestellt in zusammengefügter Konfiguration	148
Abb. 6.2	Der Schaumkern im Hauptboden (in Einbauposition)	149
Abb. 6.3	Lüftungskanäle in Einbauposition im Hauptboden des Demonstrators	150
Abb. 6.4	Tunnelbrücken in Einbauposition im Hauptboden des Demonstrators	150
Abb. 6.5	Heckboden und Zusammenbauzeichnung von Batteriedeckel, Heckboden-Oberschale, Heckboden-Unterschale, Heckquerträger-Schaumkern und Heckquerträger	151
Abb. 6.6	Fertigungs- und Montagereihenfolge für den Aufbau des LeiFu-Demonstrators	152
Abb. 6.7	Fertigstellung der Tunnelbrücken. 1 Schaumkerne werden gefräst, 2+3 Schaumkerne werden überflochten, 4 Infiltration der Carbonfasergeflechte im VAP-Verfahren, 5 Besäumung	153
Abb. 6.8	Fertigungsschritte der Luftkanäle. 1 Konzept im CAD, 2+3 Flechtprozess, 4 Luftkanäle nach Besäumung und Auswaschung der internen Stützstrukturen	154
Abb. 6.9	Fertigung von Silikonandrückstempeln für die Oberschale, um eine exaktere Drapierung an lokal komplexen Stellen zu gewährleisten. 1 Abformung der kritischen komplexen Geometrieabschnitte mit Wachsfolie, 2 Vergleich Andrückstempel mit Gussform aus Wachs nach dem Entformen, 3 Ansicht der Formzugewandten Seite eines Andrückstempels	155

- Abb. 6.10 Fertigung der Hauptboden-Oberschale. Die wichtigsten Arbeitsschritte sind: **1** Ureol-Form vorbereiten, **2** Drapieren des Verstärkungsfasergewebes, **3** Vorbereitung der Hilfsstoffe (harzdurchlässige Membran, luftdichte Vakuumfolie etc.), **4** Infiltration im VARI-Verfahren, **5** Entformung, **6** Besäumung 155
- Abb. 6.11 Fertigung der Rücksitzbank. **1** Eintrennen und Polieren der Ureolform, **2** Anfertigung der Andrückstempel für die komplexen Geometriedetails, **3** Drapierung der Carbon-Gewebelagen, **4** Platzierung der Andrückstempel zwischen Fließhilfe und VAP-Membran, **5** Konfektionierung und Fixierung der VAP-Membran, **6** Einpacken des Aufbaus mit Vakuumfolie und anschließende Infiltration mit Harz, **7** Aushärtung und Entfernen der Hilfsstoffe, **8** Entformung der Rücksitzbank. Abschließend findet die Besäumung statt 156
- Abb. 6.12 Fertigung der Heckboden-Unterschale mit ORW-Geweben. **1** Herstellung des ORW-Gewebes an einer spezialisierten Webmaschine, **2** Infiltration im VAP-Verfahren, **3** Fertiges Bauteil nach Entformung und Besäumung. Die lokal verstärkenden ORW-Fäden sind zum Teil hervorgehoben sind. 157
- Abb. 6.13 Fertigung des Heizelements. Oben: schematischer Aufbau, unten: Ansichten der realen Komponenten. **1** das Kabelbandgewebe mit SMD-Temperatursensoren, **1b** Detailaufnahme des Sensors, **2** fertiggestelltes Heizelement aus Heiztextil und Sensoren. 157
- Abb. 6.14 Platzierung des Faser-Temperatursensors in der Haupt-Oberschale. Auf der rechten Seite ist die Stelle zu erkennen, an welcher der Temperatursensor vertikal positioniert ist. Die restliche Länge ist das isolierte Kupferkabel, das zum Schutz vor dem Infiltrationsharz in einem Foliensack eingepackt ist 158
- Abb. 6.15 Montageschritte für die Tunnelbrücken. **1** Ansicht der Aussparungen im Schaumkern für die **2** Inserts. **3** Fixierung der Inserts in der Unterschale. Die Positionierung wird mittels der Aussparungen durchgeführt. Außerdem werden die Löcher für die Verschraubung gebohrt. **4** Montierte Tunnelbrücken am fertigen Modenmodul. 159
- Abb. 6.16 Montage des Heizelements. 159
- Abb. 6.17 Montageschritte des Hauptbodenmoduls (ohne Rücksitzbank). **1** Probeweise Positionierung aller Komponenten, **2** Nachbearbeitung zur Sicherstellung der Passgenauigkeit, **3** Fixierung der Komponenten während der Aushärtung des Klebstoffs mit Schraubzwingen und Gewichten 160

Abb. 6.18	Montageschritte des Heckbodenmoduls. 1 Verklebung von Ober- und Unterschale des Heckbodens, 2 Positionierung des Schaumkerns im Heckquerträger, 3 Verklebung des Heckquerträgers auf der Heck-Unterschale, 4 Fertiges Heckbodenmodul mit Inserts, Wasseranschlüssen und vier Feuchtigkeitssensoren in der Batteriemulde	161
Abb. 6.19	Positionierung der Komponenten Hauptbodenmodul, Rücksitzbank und Heckbodenmodul für die Gesamtmontage. Als Montagehilfe dient die Form für die Hauptboden-Unterschale.	161
Abb. 6.20	Montageschritte für das Lademodul. 1 Integration der Inserts in den Schaumkern (auf der Oberseite), 2 Integration des Sensorkabels mit Ladesammler in den Schaumkern, 3 Verschraubung des Lademoduls am fertigen Bodenmodul	162
Abb. 6.21	Fertigungsschritte eines Batteriemoduls. 1 Längswicklung mit harzgetränkten Glasfaserrovings, um das Kühlmodul zu fixieren, 2 fertige Umwicklung mit vorimprägnierten Carbonfaserrovings zur Unterbindung einer Längsausdehnung, 3 Temperierung im Ofen zur finalen Aushärtung des Epoxids, 4 fertiggestelltes Batteriemodul	162
Abb. 6.22	Fertigungs- und Montageschritte des Energiespeichers.	163
Abb. 7.1	Bearbeitung der CAD-Geometrie.	166
Abb. 7.2	Diskretisierung des Bauteils.	166
Abb. 7.3	Lagerung der Mulde im Prüfstand (links) und Lagerungen im CAE-Modell (rechts).	167
Abb. 7.4	Weg-Zeit-Diagramm des Impactors	168
Abb. 7.5	Eindringen des Impactors im LSC-Versuch vor Eindringen des Impactors (links) und nach Eindringen des Impactors (rechts)	169
Abb. 7.6	Vergleich der Energie des LSC-Versuches im Versuch und der Simulation	169
Abb. 7.7	Versuchsaufbau der Fallturmversuche (links) und Impactor im Bauteil (rechts)	170
Abb. 7.8	Vergleich des Kraftverlaufs während des Fallturmversuchs im Versuch und der Simulation	171
Abb. 7.9	Vergleich der aufgenommenen Energie während des Fallturmversuchs im Versuch und der Simulation	172
Abb. 7.10	Teilflächenresonanzen aus FE-Berechnungen und definierter Bereich für experimentelle NVH-Untersuchungen	173
Abb. 7.11	Frequenzspektren unter Variation einer zentrisch positionierten Zusatzmasse durch das Eigengewicht des Exciters einer ebenen CFK-Platte mit LeiFu-Lagenaufbau und Anregung durch einen Lautsprecher	174