

Liliane G. Ngahane Nana

Methodik zur Identifikation  
von anforderungsoptimalen  
Konfigurationen an  
Multi-Material-Bauweisen

---

**Methodik zur Identifikation von anforderungsoptimalen  
Konfigurationen an Multi-Material-Bauweisen**

**Identification Process of Optimal Configurations for Multi-  
Material-Structures**

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

vorgelegt von  
Liliane Gilberte Ngahane Nana

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Feldhusen  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Löwer  
Tag der mündlichen Prüfung: 9. Juni 2020

---

Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik

Band 31

**Liliane G. Ngahane Nana**

**Methodik zur Identifikation von anforderungsoptimalen  
Konfigurationen an Multi-Material-Bauweisen**

Shaker Verlag  
Düren 2020

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2020)

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7699-8

ISSN 1438-4930

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

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## Danksagung

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am ehemaligen Institut und Lehrstuhl für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus der RWTH Aachen (ikt).

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen, der mir die Möglichkeit zur Promotion gegeben hat. Die zahlreichen Diskussionen und die gewährten Freiräume, verbunden mit konstruktiven Kritiken haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Zusätzlich danke ich Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manuel Löwer für die Übernahme des Koreferates und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Burkhard Corves für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Allen Kolleginnen und Kollegen des ehemaligen ikt, insbesondere denen aus der Forschungsgruppe Hybride Strukturen bzw. Multi-Material Strukturen, möchte ich für die gemeinsame Zeit am Institut danken, allen Freunden, die in der Forschung arbeiten, möchte ich für Ihre persönliche und moralische Unterstützung danken, ich danke euch allen für die Räte in beruflichen und persönlichen Belangen. Stellvertretend möchte ich Dr.-Ing. Stephanie Dallmeier, meine ehemalige Bürokollegin, für die wunderbare gemeinsame Zeit und die wertvollen Diskussionen; Zhuzhell Montano für die gute und produktive Kooperation und Eric Tchoupou Lando für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und die vielen Anregungen danken.

Ganz besonders möchte ich meiner Familie danken: Meinen Eltern Gilbert Nana und Madeleine Ngantcha Tchana und meinen Geschwister Orphée, Claire, Josiane, Marie-Paule und Lucrèce, die mich unterstützt und gefördert haben. Ich danke euch vor allem dafür, dass ihr in der Schlussphase trotz der Entfernung nie aufgehört habt, mich zu ermutigen.

Meinem Mann Heinsteinst Foto danke ich von ganzem Herzen für die Liebe und die unendliche Bereitschaft, mich zu unterstützen.



## Zusammenfassung

Die Gestaltung technischer Strukturen wird immer komplexer und anspruchsvoller, und das wird weiterhin so bleiben. Unter den zu erfüllenden Herausforderungen ist der Leichtbau in Kombination mit anderen Funktionen von großer Bedeutung. Dies hat zur Entwicklung und Ausarbeitung einer großen Anzahl von Materialien geführt, um Strukturen zu entwerfen, die leicht sind, aber gleichzeitig eine vergleichbare Leistung wie bereits mit Metall entworfene Strukturen aufweisen. Dennoch fällt auf, dass der in Dr. Ashbys Diagrammen gezeigte dreidimensionale Querschnitt der Materialeigenschaften leere Flächen enthält. Diese Leerstellen sind Signale, die auf die Notwendigkeit hinweisen, neue Materialien zu schaffen, um die Lücken in diesen Diagrammen zu füllen. Da die Entwicklungsingenieure nicht immer über ausreichende Kenntnisse verfügen, um diesem Bedarf nachzukommen, und auch nicht immer die Zeit haben, auf die Entwicklung neuer Materialien zu warten, greifen sie auf das Konzept von Multi-Material-Strukturen zurück, die eine mögliche Lösung sein können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, die bei der Gestaltung von Multi-Material-Strukturen unterstützt wird. Diese Methodik verwendet eine Kombination aus drei Elementen, bestehend aus einer Architekturdatenbank, einer Materialbibliothek und einem Optimierungsalgorithmus. Die grundlegende Architekturdatenbank, die erweiterbar ist, enthält die üblichen Multi-Material Architekturen, aus denen es gewählt werden kann. In der Materialbibliothek sind die verfügbaren oder zu erwerbenden Materialien mit allen Eigenschaften erfasst, die für die Berechnung der benötigten Funktionen notwendig sind. Der Optimierungsalgorithmus ist das Instrument, das es ermöglicht, die Kombinationen zwischen den verschiedenen Materialien herzustellen, um die interessantesten Architekturen für den zu behandelnden Fall zu bilden.

Das Ergebnis dieser Methodik ist die Lieferung einer Liste von potenziellen Strukturen mit ihren jeweiligen Eigenschaften. Die endgültige Wahl der Struktur kann, in Abhängigkeit von der Anzahl der angebotenen Lösungen, entweder direkt nach einer kurzen Analyse der Lösungen oder mittels eines Auswertungsalgorithmus getroffen werden, der mit der entwickelten Methodik gekoppelt werden könnte.



## Abstract

The design of technical structures is becoming more and more complex and competitive, and this is not going downhill. That is, the structures to be designed must fill in more and specifications.

Among the challenges, light construction is of great importance. This gave rise to the development and the elaboration of a significant number of materials in order to be able to design structures but providing performances as interesting as structures having been designed with steel, because the simple fact being light is not interesting overall. Despite the abundance of already existing materials, it should be noted that the three-dimensional section through the properties of the materials represented in the diagrams presented in the work of Prof Ashby present empty areas. These gaps are signals that mark the need to create new materials to cover all the diagrams.

Design engineers do not always have the necessary knowledge sufficient to be able to overcome this need, nor always the time to wait for new materials to be created, therefore turn to the concept of multi-material structures which also allow, to fill these gaps.

In the framework of this doctorate, a methodology was developed to help in the design of multi-material structures fulfilling very precise and sometimes discordant performances. This methodology uses a combination of three elements, namely an architecture database, a material library and an optimization algorithm which, depending on needs, determines which materials must be combined in which arrangements in order to obtain certain properties for a product to be designed. The basic architectural database contains the usual multi-material architectures from which the designer can choose, it can be supplemented at any time in order to be able to resolve the problem posed. The material library contains the materials available or to be acquired; it is important that all the properties necessary for the calculation of the required functions are entered in this library. The optimization algorithm is the element which makes it possible to combine the different materials in order to build the architectures which are of interest for the case considered, to evaluate the different combinations and to eliminate those which are not relevant for the structure to develop.

The result of this methodology is the delivery of a list of potential structures with their respective properties that meet the requirements defined in the specifications. The final choice of the structure to be designed can be made directly following a brief analysis of the solutions delivered. Depending on the number of solutions provided and the properties of each solution compared to the other solutions, a more elaborate analysis may be required to make the final choice. In this case an analysis algorithm should be coupled to the methodology developed in this work.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Kontext .....	2
1.2	Zielsetzung .....	3
1.3	Gliederung .....	5
<b>2</b>	<b>Grundlage und Definitionen</b> .....	<b>7</b>
2.1	Multi-Material-Strukturen .....	7
2.2	Hauptmerkmale der Optimierung .....	10
2.2.1	Allgemeine Formulierung eines Optimierungsproblems .....	11
2.2.2	Klassifizierung von Strukturoptimierungsmethoden .....	12
2.2.3	Operative Funktionsfähigkeit und Einteilung der Optimierungsverfahren.....	13
2.3	Grundzüge der Werkstoffauswahl .....	16
2.3.1	Systematisiertes Vorgehen zur Werkstoffauswahl nach Illgner .....	17
2.3.2	Werkstoffauswahl mit Kennzahlverfahren nach Schott.....	18
2.3.3	Vorgehensweise nach Grosch .....	19
2.3.4	Werkstoffauswahl nach Ehrlenspiel und Kiewert .....	20
2.3.5	Materialauswahl nach Ashby.....	22
<b>3</b>	<b>Stand der Forschung</b> .....	<b>27</b>
3.1	Mehrzieloptimierung von Multi-Material-Strukturen .....	27
3.2	Kritische Betrachtung der verwendeten Vorgehensweisen.....	33
<b>4</b>	<b>Grobe Beschreibung der Methodik</b> .....	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>Festlegung der Architekturdatenbank und des Ansatzes für die Materialauswahl</b> .....	<b>39</b>
5.1	Allgemeiner Aufbau der Architekturdatenbank .....	39
5.2	Inhalt der Materialbibliothek .....	45
<b>6</b>	<b>Auswahl der geeigneten Optimierungsalgorithmen</b> .....	<b>49</b>
6.1	Besonderheiten von Multi-Material-Strukturen .....	50
6.2	Konzept der Pareto-Methoden .....	50
6.3	Übersicht geeigneter Optimierungsalgorithmen .....	52
6.3.1	Ameisenalgorithmen (AO).....	53
6.3.2	Genetische Algorithmen (GA) .....	54
6.3.3	Greedy Algorithmen (GrA).....	55
6.3.4	Partikelschwarmoptimierung (PSO) .....	55

6.3.5	Simulierte Abkühlung (SO).....	56
6.3.6	Tabu Suche (TS).....	58
6.4	Auswertung der geeigneten Optimierungsverfahren .....	58
6.4.1	Auswahl der zu verwendeten Bewertungsmethode.....	59
6.4.2	Bewertung von Optimierungsalgorithmen mit der ausgewählten Methode .....	60
6.5	Details zur Funktionsweise des geeignetsten Algorithmus .....	69
<b>7</b>	<b>Entwurf einer Methodik zur Identifikation von anforderungsoptimalen Strukturen.....</b>	<b>75</b>
7.1	1. Phase: Vorarbeit .....	77
7.2	2. Phase: Synthese der fallspezifischen Datenbank.....	80
7.3	3. Phase: Implementierung des Optimierungsalgorithmus .....	87
7.4	4. Phase: Kontrolle und Analyse der Ergebnisse .....	96
7.5	5. Phase: Nacharbeit .....	97
<b>8</b>	<b>Validierung anhand einer praktischen Fallstudie .....</b>	<b>99</b>
8.1	1. Phase: Vorarbeit .....	99
8.1.1	Ablaufschritt 1.0 Definition der Anforderungen .....	100
8.2	2. Phase: Synthese der fallspezifischen Datenbank.....	100
8.2.1	Ablaufschritt 2.1 a: Festlegung der möglichen Architektur(en).....	100
8.2.2	Ablaufschritt 2.1 b: Auswahl der angängigen Materialien .....	101
8.2.3	Ablaufschritt 2.1 a-b: Zusammenstellung der erfassten Informationen .....	103
8.2.4	Ablaufschritt 2.2: Aufbau der fallspezifischen Datenbank .....	103
8.3	3. Phase: Implementierung des Optimierungsalgorithmus .....	104
8.3.1	Ablaufschritt 3.1: Definition der Betriebsparameter .....	105
8.3.2	Ablaufschritt 3.2: Erzeugung der Startpopulation .....	107
8.3.3	Ablaufschritt 3.3: Bewertung der Lösungen aus der 1. Iteration .....	108
8.3.4	Ablaufschritt 3.4: Selektion.....	110
8.3.5	Ablaufschritt 3.5: Erzeugung der nächsten Generation .....	110
8.3.6	Ablaufschritt 3.3: Bewertung der Lösungen aus der 2. Iteration .....	111
8.3.7	Ablaufschritt 3.6: Ende des Algorithmus.....	111
8.4	4. Phase: Kontrolle und Analyse der Ergebnisse .....	111
8.4.1	Ablaufschritt 4.1: Kontrolle der Ergebnisse.....	111
8.4.2	Ablaufschritt 4.2: Analyse der Ergebnisse .....	112
8.5	5. Phase: Nacharbeit .....	112
8.5.1	Dokumentation.....	113
8.6	Kritische Betrachtung der Validierung .....	113
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>115</b>

---

9.1	Zusammenfassung .....	115
9.2	Ausblick .....	116
<b>Anhang</b>	.....	<b>119</b>
	Anhang A: Information für die 1. Phase.....	119
	Anhang B: Informationen für die 3. Phase.....	121
<b>Literaturverzeichnis</b>	.....	<b>125</b>



---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Dreidimensionaler Schnitt durch Materialeigenschaften: Das Ashby-Diagramm nach /Spieß 2016/ .....	3
Abbildung 2: Karosseriebau des Porsche Panamera nach /Press Box 2015/ .....	8
Abbildung 3: 3-D Querschnittansicht des Druckanzugs eines Astronauten nach /Marcy et al. 2004/ .....	9
Abbildung 4: Einteilung der Strukturoptimierung gemäß der Designvariablenart nach /Schuhmacher et al. 2013/ .....	13
Abbildung 5: Arbeitsweise der Optimierungsschleife .....	14
Abbildung 6: Klassifikation der Optimierungsverfahren .....	15
Abbildung 7: Materialauswahl während des Gestaltungsprozesses nach /Sirisalee et al. 2006/ .....	17
Abbildung 8: Kurzfassung des Iterationsverfahrens zur Systematisierung der Materialauswahl gemäß Illgner nach /Benders 2011/ .....	18
Abbildung 9: Grundsystem der Werkstoffauswahl nach Grosch nach /Grosch 1986/ .....	20
Abbildung 10: Allgemeine Werkstoffauswahlprozess nach Ehrlenspiel und Kiewert (vgl. Ehrlenspiel et al. 1990).....	21
Abbildung 11: Checkliste für Werkstoffeigenschaften nach Ehrlenspiel und Kiewert nach /Ehrlenspiel et al. 1990/ .....	22
Abbildung 12: Materialauswahlprozess nach Ashby nach /Ashby 2016/ .....	23
Abbildung 13: Schematische Darstellung mit Kennwertbereichen für einige Werkstoffklasse und mit Richtwerten für die drei Werkstoffindizes für steifen Leichtbau nach /Ashby 2016/ .....	24
Abbildung 14: Mögliche Eigenschaften Multi-Material-Strukturen in Abhängigkeit von den Eigenschaften der kombinierten Werkstoffe nach /Ashby 2016/ .....	25
Abbildung 15: Familien von Konfigurationen hybrider Materialien nach /Ashby 2016/ .....	25
Abbildung 16: Ablauf des allgemeinen Lösungsprozesses nach /Pahl et al. 2007/ .....	36
Abbildung 17: Kurzgefasste Methodik zur Identifizierung von optimalen Kombinationen .....	38
Abbildung 18: Beispiel einer elementaren Struktur des Teilchenverbundwerkstoffes nach /Arnold 2013/ .....	41

---

Abbildung 19: Beispiele von Faserverbundwerkstoffen nach /Arnold 2013/ .....	41
Abbildung 20: REM-Aufnahmen eines Ethylen-Vinylacetat-Schaums (links) und eines PUR-Weichschaums (rechts) nach /Brückner 2012/ .....	42
Abbildung 21: Beispiele von Wabenkonstruktionen; .....	43
Abbildung 22: Einteilung von Schichtverbunden nach /Liewald 2014/ .....	43
Abbildung 23: Topologische Verzahnung nach /Estrin et al. 2001/ .....	44
Abbildung 24: Darstellung von Materialgruppen zur Bildung von Multi-Material-Strukturen .....	46
Abbildung 25: Illustratives Beispiel für das Dominanzkonzept .....	51
Abbildung 26: Vorgehen bei der Nutzwertanalyse nach /Kühnapfel 2014/ .....	60
Abbildung 27: Ablaufplan eines Genetischen Algorithmus .....	70
Abbildung 28: Darstellung des Kreuzungsverhaltens nach /Borgelt 2017/ .....	72
Abbildung 29: Darstellung des Mutationsverhaltens nach /Borgelt 2017/ .....	73
Abbildung 30: Methodik mit den selektierten Konzepten und Strategien .....	76
Abbildung 31: Darstellung der Methodik mit den Phasen .....	77
Abbildung 32: Vorgehensweise bei der Vorarbeit, um die Anforderungliste zu generieren .....	78
Abbildung 33: Beispiel für eine Anforderungliste .....	80
Abbildung 34: Prozedur zur Festlegung der zu verwendenden Architektur .....	82
Abbildung 35: Verfahrensablauf zur Materialauswahl .....	85
Abbildung 36: Vorgehen zur Konformitätsprüfung der generierten Daten .....	86
Abbildung 37: Beispiel für eine fallspezifische Bibliothek .....	87
Abbildung 38: Ablauf eines Genetischen Algorithmus .....	88
Abbildung 39: Überblick der zu definierenden Betriebsparameter des Algorithmus .....	90
Abbildung 40: Exemplarische Entstehung der Anfangspopulation .....	91
Abbildung 41: Bewertung der Lösungen der Startpopulation hinsichtlich der Zielfunktionen .....	92
Abbildung 42: Darstellung der Funktionsweise von Stochastischen universellen Sampling .....	94
Abbildung 43: Beispielhafte Darstellung des One-Point-Crossover .....	94
Abbildung 44: Beispielhafte Darstellung der modifizierten Swap-Mutation .....	95
Abbildung 45: Anschauliche Ergebnisdarstellung am Ende des Algorithmusablaufes .....	96
Abbildung 46: Vorgehensweise bei der Kontrolle und Analyse der Ergebnisse .....	96
Abbildung 47: Vorgehensweise für die Nacharbeit .....	98
Abbildung 48: Spezifische Bibliothek für die praktische Fallstudie .....	104

---

Abbildung 49: Konfiguration der Schichtverbundstruktur zur Auswertung der Algorithmen.....	105
Abbildung 50: Designvariablen für die Fallstudie.....	106
Abbildung 51: Restriktionen für die Fallstudie .....	106
Abbildung 52: Zielfunktionen der Fallstudie und deren Restriktionen .....	107
Abbildung 53: Operative Parameter des Genetischen Algorithmus .....	107
Abbildung 54: Kombinationsmodus zur Lösungsfindung; <sup>(i)</sup> Daten aus Abbildung 63, <sup>(ii)</sup> Daten aus Abbildung 64 .....	108
Abbildung 55: Bewertung der Zielfunktionen bei der Startpopulation (1.Stufe der Bewertung) ....	109
Abbildung 56: Gesamtbewertung der Startpopulation (2. Stufe der Bewertung) .....	109
Abbildung 57: Drehrad zur Selektion von „Eltern“ .....	110
Abbildung 58: Ergebnis der Kreuzung.....	110
Abbildung 59: Ergebnis der Mutation .....	111
Abbildung 60: Ergebnisse aus den algorithmischen Berechnungen .....	112
Abbildung 61: Leitlinie mit Hauptmerkmalen zum Ermitteln von Anforderungen nach /Feldhusen et al. 2013/.....	119
Abbildung 62: Anforderungsliste für die praktische Fallstudie .....	120
Abbildung 63: Zusammenfassung der Materialien der Außenschicht und ihre Eigenschaften .....	121
Abbildung 64: Zusammenfassung der Materialien der Innenschicht und ihre Eigenschaften.....	122
Abbildung 65: Generierte Lösungen für die Startpopulation (1. Iteration) .....	122
Abbildung 66: Bewertung der Zielfunktionen bei der 2. Generation .....	123



---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gegenüberstellung von Kennzahlen zur Werkstoffauswahl (vgl. Schott 1981).....	19
Tabelle 2: Inhalt der Architekturdatenbank mit Eigenschaften der Strukturen.....	40
Tabelle 3: Optimierungsalgorithmen als Entscheidungsalternativen.....	61
Tabelle 4: Liste der abgeleiteten Entscheidungskriterien.....	62
Tabelle 5: Kreuztabelle zur Gewichtung von Bewertungskriterien .....	64
Tabelle 6: Ergebnisse der Gewichtung anhand der Kreuztabelle .....	65
Tabelle 7: Punktwertkorridore auf einer 4-Punkte-Skala.....	65
Tabelle 8: Korrelation der Entscheidungsalternativen mit den Entscheidungskriterien .....	67
Tabelle 9: Aufstellung der Zielwertmatrix .....	67
Tabelle 10: Ergebnisse der Nutzwertanalyse .....	68
Tabelle 11: Rangliste mit geänderten Gewichtungen der Entscheidungskriterien .....	69
Tabelle 12: Gesamtbewertung von erzeugten Lösungen .....	93
Tabelle 13: Ergebnis der Evaluation der Architekturen.....	101
Tabelle 14: Zusammenfassung von ausgewählten Materialien .....	103



---

## Abkürzungen

AHP	Analytische Hierarchieprozess
AO	Ameisenalgorithmen
CES	Cambridge Engineering Selector
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
FE	Finite Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
GA	Genetische Algorithmen
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
GrA	Greedy Algorithmen
MKO	Mehrkriterielle Optimierung
MMS	Multi-Material-Struktur
MWC	Mean Weighted Characteristics
MZO	Mehrzieloptimierung
NWA	Nutzwertanalyse
PE	Produktentwicklung
PMI	Polymethacrylimid
PS	Polystyrol
PSO	Partikelschwarmoptimierung
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
RCL	restricted candidate list
SA	Simulierte Abkühlung
TS	Tabu Suche