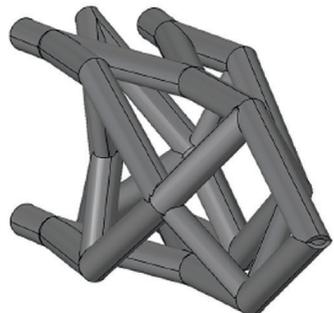
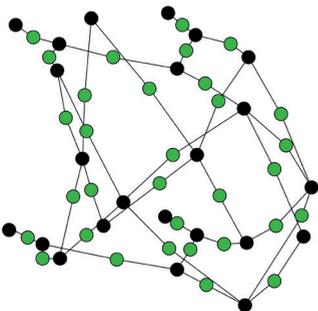
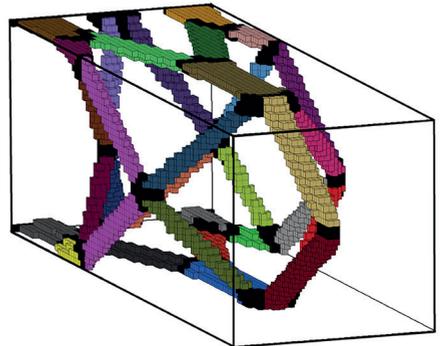
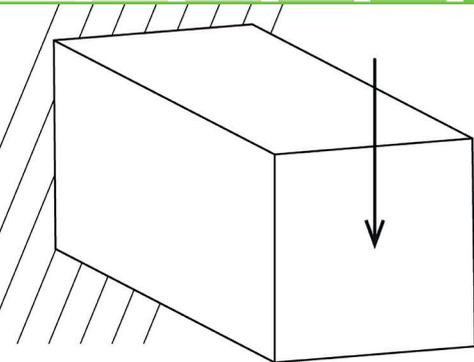


Integration der Topologie- und Formoptimierung in den automatisierten digitalen Entwurf von Fachwerkstrukturen

Bergische Universität Wuppertal
Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen

Manuel Ramsaier



Integration der Topologie- und Formoptimierung in den automatisierten digitalen Entwurf von Fachwerkstrukturen

**Dissertation
zur Erlangung eines Doktorgrades**

in der
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
der
Bergischen Universität Wuppertal



vorgelegt von
Manuel Ramsaier
aus Ravensburg

Wuppertal 2020

Tag der mündlichen Prüfung: 18.11.2020

Berichte aus dem Maschinenbau

Manuel Ramsaier

**Integration der Topologie- und Formoptimierung
in den automatisierten digitalen Entwurf von
Fachwerkstrukturen**

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Wuppertal, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7788-9

ISSN 0945-0874

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 • E-Mail: info@shaker.de

Manuel Ramsaier

Integration der Topologie- und Formoptimierung in den automatisierten digitalen Entwurf von Fachwerkstrukturen

Dissertation, Bergische Universität Wuppertal,

Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik,

Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen, Juni 2020

Kurzfassung

Ein derzeit die Forschung prägendes Thema ist die ganzheitliche digitale Abbildung des Produktentwurfs und der Fertigung. Diese ganzheitliche digitale Abbildung des Produktlebenszyklus erfordert eine interdisziplinäre Datenmodellierung und -verarbeitung, um konzeptionell das Problem der vielen Software-Werkzeuge und damit verbundenen Schnittstellen zu lösen. In dieser Arbeit wird hierzu ein Engineering-Framework mit graphenbasierten Entwurfssprachen eingesetzt.

In der vorliegenden Dissertation werden Werkzeuge der dichte-basierten Topologieoptimierung für den Leichtbau genutzt. Die Topologieoptimierung ist eine Art der Strukturoptimierung, welche das Entstehen und Verschwinden von Löchern im Bauraum zulässt und die Topologie damit ändert. Sie wird in einem frühen (Konzept-) Stadium eingesetzt und weist aufgrund der dort herrschenden Freiheitsgrade enorme Potentiale hinsichtlich der Einsparung von Gewicht auf. Das Ziel dieser Arbeit ist die Einbettung der Topologieoptimierung in den ganzheitlichen Produktentwurf, sowohl in der Phase des Modelaufbaus als auch der Rückführung des Optimierungsergebnisses.

Die Rückführung des Ergebnisses der Topologieoptimierung in eine parametrisierte Geometrie ist derzeit die größte Hürde für deren vollständige Automatisierung. Mithilfe eines physikalisch basierten Kriteriums wird eine Lösung für dieses Problem am Beispiel von Fachwerkstrukturen vorgeschlagen. Dabei werden die Spannungstensoren des Analyseergebnisses der Topologieoptimierung dazu verwendet, die Struktur in einzelne Balken aufzuteilen. Mithilfe dieser Strukturinterpretation ist die automatisierte Erstellung einer parametrischen Geometrie und eines FE-Modells mit eindimensionalen Balkenelementen für die Formoptimierung möglich.

Der vorgestellte Algorithmus zur Strukturinterpretation ist in eine graphenbasierte Entwurfssprache eingebettet, welche das Abbilden anderer Domänen, wie beispielsweise der Funktionsmodellierung, der Kostenmodellierung und der Fertigungsmodellierung zulässt.

Stichworte: Topologieoptimierung, Entwurfssprachen, Fachwerkstrukturen, Strukturinterpretation

Manuel Ramsaier

Integration of Topology and Shape Optimization into a Rule-Based Design of Framework Structures

PhD thesis, University of Wuppertal, School of Mechanical Engineering and Safety Engineering, Chair for Optimization of Mechanical Structures, June 2020

Abstract

One of the topics currently shaping research is the continuous digitalisation of product design and production. This holistic digital representation of the product life cycle requires interdisciplinary data modelling and processing in order to conceptually solve the problem of the many software tools and associated interfaces. In this thesis an engineering framework with graph-based design languages is used for this purpose.

In this dissertation, tools of density-based topology optimization are used. Topology optimization is a type of structural optimization that allows the formation and disappearance of holes in the design space and thus changes the topology. Topology optimization is used at an early (concept) stage and, due to the degrees of freedom it offers, has enormous potential for weight saving. The aim of this thesis is to integrate topology optimization in the holistic product design, both in the phase of model construction and in the reconstruction of the optimization result.

The conversion of the result of topology optimization to a parameterized geometry is currently the greatest obstacle to its complete automation. With the help of a physically based criterion, a solution for this problem is proposed using the example of truss structures. The stress tensors of the optimization result are used to divide the structure into individual beams. With the help of this structure decomposition, the automated creation of a parametric geometry and a FE-model with one-dimensional beam elements for shape optimization, is possible.

The presented algorithm for structure interpretation is embedded in a graph-based design language which allows the mapping of other domains, such as functional modeling, cost modeling and manufacturing modeling.

Keywords: topology optimization, design language, truss structures, structure interpretation

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsprojekt “Zentrum für angewandte Forschung an Hochschulen angewandter Wissenschaften (ZAFH): *Digitaler Produktlebenszyklus (DiP)*“. Die Promotion erfolgte in Kooperation mit dem *Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen* an der *Bergischen Universität Wuppertal*.

Zahlreiche Menschen aus meinem Umfeld waren für mich in dieser Zeit unabdingbar und haben ihren Teil dazu beigetragen, dass ich diese Arbeit schreiben konnte. Ich möchte hier mit diesen Zeilen meinen Dank ausdrücken.

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Axel Schumacher gilt mein besonderer Dank für die Betreuung meiner Promotion.

PD Dr.-Ing. habil. Stephan Rudolph von der *Universität Stuttgart* möchte ich für die Übernahme des Zweitgutachtens danken. Ich danke ihm und besonders Prof. Dr.-Ing. Markus Till von der *Hochschule Ravensburg-Weingarten* für die zahlreichen wertvollen Anmerkungen und Diskussionen während der Entstehung meiner Arbeit.

Mein Dank gilt meinen Bürokollegen aus Weingarten: Fabian Wunsch, Kevin Holder, Andreas Zech, Michael Elwert, Johannes Burkhart und auch allen Kolleginnen und Kollegen aus dem Forschungsprojekt und aus der IILS mbH. Ganz besonders danke ich Rebeka Weißenberger, die bei mir immer wieder bewirkt hat, dass meine Selbstkritik einer Hoffnung wich. Dem Rückschaufehler zum Trotz erinnere ich mich gut daran, um wie viel leichter die Last der Unsicherheit durch ein gutes Gespräch bei einer Tasse Grüntee mit ihr wurde.

Ich danke allen Doktoranden aus Wuppertal für die zahlreichen Tipps und Diskussionen rund um das Thema, insbesondere Constantin Diez, Robert Dienemann und Niklas Klinke.

Ich danke meiner Familie dafür, dass sie mich stets unterstützt und an mich geglaubt hat. Besonders herzlich möchte ich Julia, meiner Frau danken. Die Unterstützung, welche ich in dieser Zeit erfahren durfte, war für mich von höchstem Wert und kommt in der Wahrnehmung nach Außen viel zu kurz. Es ist viel mehr, als ich verdiene.

Bad Wurzach, im Juni 2020

Manuel Ramsaier

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	I
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Motivation	1
1.2 Aufbau der Dissertation	5
2 Stand des Wissens	7
2.1 Digitaler Produktentwurf mit Entwurfssprachen	7
2.1.1 Motivation	7
2.1.2 Informationsdarstellung und -flüsse	8
2.1.3 Beschreibung der Geometrie mit Entwurfssprachen	14
2.1.4 Fertigungskostenmodellierung mit Entwurfssprachen	17
2.2 Simulation des linearen Strukturverhaltens	20
2.3 Strukturoptimierung im digitalen Entwurf	23
2.3.1 Begriffsdefinitionen	23
2.3.2 Arten der Strukturoptimierung	23
2.3.3 Dichtebasierte Topologieoptimierung	27
2.4 Clustering-Algorithmen	30
2.4.1 Überblick	30
2.4.2 KMeans als partitionierender Algorithmus	31
2.4.3 DBSCAN als dichtebasierter Algorithmus	34
2.5 Geometrierückführung	35
2.5.1 Interpretation mittels Isowerten und Dichtekonturen	35
2.5.2 Interpretation mittels geometrischer Approximation	36
2.5.3 Interpretation von Balkenstrukturen mittels Skelettierung	37
3 Automatische Erstellung der Topologieoptimierungsmodelle	41
3.1 Bauraumgenerierung	41
3.2 FEM-Modellierung und Steuerung der Strukturoptimierung	42
3.3 Beispiel Kragbalken	45
4 Physik-basierte Strukturinterpretation und Geometriemodellierung	49
4.1 Physik-basierte Topologie-Extraktion	50
4.1.1 Ergebnisaufbereitung der Topologieoptimierung	51
4.1.2 Berechnung der Hauptspannungen	52
4.1.3 Balken- und Verbindungsstrukturen	55

4.1.4	Zug- und Druckstrukturen der eindimensionalen Strukturen	56
4.1.5	Histogramm Clustering	58
4.1.6	Verbindungszone	62
4.1.7	Vergleich alternativer Clustering-Algorithmen	64
4.1.8	Abstrakte Graphenrepräsentation der Strukturinterpretation	66
4.1.9	Berücksichtigung mehrerer Lastfälle	66
4.2	Geometriegenerierung für die Formoptimierung	69
4.3	Formoptimierung der Struktur	69
4.4	Erzeugung einer geschweißten Rohrkonstruktion	71
4.4.1	Datenstruktur	71
4.4.2	Geometrieerzeugung geschweißter Rohrverbindungen	71
4.4.3	Fertigungsrestriktionen beim Schweißvorgang	73
4.5	Grenzen für die Anwendbarkeit der vorgestellten Methode	74
5	Anwendungen	77
5.1	Kragbalken	77
5.1.1	Generierung des Topologieoptimierungsmodells	78
5.1.2	Strukturinterpretation	79
5.1.3	Varianten des Kragbalkens	81
5.1.4	Formoptimierung mit genetischem Algorithmus	84
5.1.5	Geometrieausprägung als geschweißte Rohrkonstruktion	86
5.1.6	Erzeugtes Kostenmodell	87
5.2	Kran	88
5.2.1	Problemstellung und Optimierungsmodell	88
5.2.2	Strukturinterpretation	91
5.2.3	Geometrieausprägung der beiden Strukturinterpretationen	94
5.2.4	Kranvariante mit dreieckigem Ausleger	94
5.3	Multicopter	97
5.3.1	Problemstellung und Optimierungsmodell	97
5.3.2	Strukturinterpretation	98
6	Zusammenfassung und Ausblick	103
6.1	Ergebnisse	104
6.2	Ausblick	105
	Literaturverzeichnis	106

Anhang

A Flussdiagramm	112
B Pseudo-Code	114
C Zwei- und dreiachsiger Spannungszustand	115

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

BREP	Boundary Representation
CAD	Computer Aided Design
CSG	Constructive Solid Geometry
DBSCAN	Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise
FE	Finite Elemente
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
IDE	Integrated development environment
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
TopOpt	Topologieoptimierung
UML	Unified Modeling Language

Operatoren

Symbol	Bedeutung
x	Skalar
\mathbf{x}	Vektor (Spaltenvektor), \mathbf{x}^T ist der zugehörige Zeilenvektor
x_i	i -te Komponente des Vektors \mathbf{x}
$ \mathbf{x} $	Betrag des Vektors \mathbf{x} , $ \mathbf{x} = \sqrt{\mathbf{x}^T \mathbf{x}}$

Lateinische Zeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
\mathbf{A}_{E_i}	Assemblierungsmatrix des Elements i , $\mathbf{u}_{E_i} = \mathbf{A}_{E_i} \mathbf{u}$	-
c	Compliance (mittlere Nachgiebigkeit), identisch mit der Formänderungsenergie	Nmm
C_i	Cluster i bestehend aus finiten Elementen	-
\mathbf{C}	Liste mit mehreren Clustern	-
d_Z	Durchmesser eines kreisrunden Balkenelements	mm
e_i	Finites Element i	-
$e_{i,N}$	Nachbar-Elemente des finiten Elements i . Als Nachbar-Element gilt jedes finite Element, welches sich mindestens einen Knoten mit finitem Element i teilt	-
\mathbf{E}_{E_i}	Elastizitätsmatrix des finiten Elements i	MPa
E_i	Elastizität des finiten Elements i	MPa
E_0	Elastizität des Grundmaterials	MPa
$h_{\theta\varphi}$	Wert der Histogramm-Matrix $\mathbf{H}_{\theta\varphi}$ bei θ, φ	-
$\mathbf{h}_{\theta\varphi,N}$	Nachbarschaftswert der Histogramm-Matrix für die Zelle $\mathbf{h}_{\theta\varphi}$. $h_{\theta\varphi,N} = [h_{\theta\varphi,n}, h_{\theta\varphi,s}, h_{\theta\varphi,e}, h_{\theta\varphi,w}, h_{\theta\varphi,nw}, h_{\theta\varphi,ne}, h_{\theta\varphi,sw}, h_{\theta\varphi,se}]$	-
$\mathbf{H}_{\theta\varphi}$	Histogramm-Matrix mit den Dimensionen $[\frac{180}{\alpha_{bin}}, \frac{360}{\alpha_{bin}}]$	-
P	Penaltyexponent (Bestrafungsexponent) der SIMP-Methode	-
\mathbf{p}	Systemlastvektor, $\mathbf{p}^T = [p_{1x} \ p_{1y} \ p_{1z} \ p_{2x} \ p_{2y} \ p_{2z} \ p_{N_kz}]$	N
\mathbf{K}	lineare Systemsteifigkeitsmatrix	Nmm ⁻¹
\mathbf{M}	Alle Maxima des Histogramms $\mathbf{H}_{\theta\varphi}$. $\mathbf{M} = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n]$	-
\mathbf{N}	Matrix mit den Ansatzfunktionen	-
N_D	Anzahl der Designelemente	-
N_E	Anzahl der Elemente im FE-Modell	-
N_K	Anzahl der Knoten im FE-Modell	-
\mathbf{n}	Normalenvektor der Schnittebene	-
\mathbf{t}	Spannungsvektor	MPa
\mathbf{t}_{E_i}	Dominierender Hauptspannungsvektor des finiten Elements i	MPa

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\mathbf{t}_{E_i, \theta \varphi}$	Dominierender Hauptspannungsvektor des finiten Elements i in Kugelkoordinaten	°
\mathbf{u}	Systemverschiebungsvektor $\mathbf{u}^T = [u_{1x} u_{1y} u_{1z} u_{2x} u_{2y} u_{2z} \dots u_{N_k z}]$	mm
v	gefülltes Volumen des Designbereichs	mm ³
v_i	gefülltes Volumen des finiten Elements i	mm ³
v_{0i}	Grundvolumen des finiten Elements i	mm ³
v_f	Volumenfüllung des Designbereichs	-
\mathbf{x}_k	Datenpunkte im KMeans Clustering	-
$\tilde{\mathbf{x}}$	Vektor der Elementdichten	-

Griechische Zeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
α_{bin}	Winkel für die Einteilung des Histogramms $H_{\theta\varphi}$	°
α_m	Schwellenwert für das Zusammenfassen zweier Balken-Cluster	°
ϵ	Schwellenwert für DBSCAN Clustering-Prozess	-
ϵ_{E_i}	Verzerrungen in Element i in Voigt'scher Notation $\epsilon_{E_i} = [\epsilon_{xx} \ \epsilon_{yy} \ \epsilon_{zz} \ \epsilon_{yz} \ \epsilon_{xz} \ \epsilon_{xy}]$	MPa
Π	elastisches Potential	Nmm
μ_j	Maximum im Histogramm $\mathbf{H}_{\theta\varphi}$. $\mu_j^T = [\theta_j, \varphi_j]$	°
μ_k	Lage der Clusterzentren im KMeans Clustering	-
ν	Querkontraktionszahl (Poissonzahl)	-
σ_D	Betragsmäßig maximale Hauptspannung eines Spannungstensors $\sigma_D = \max(\sigma_I , \sigma_{II} , \sigma_{III})$	MPa
σ_{DR}	Richtungsvektor von σ_D in kartesischen Koordinaten	MPa
$\sigma_{DR_{\theta\varphi}}$	Richtungsvektor von σ_D in Kugelkoordinaten	MPa
σ_{E_i}	Spannungen in Element i in Voigt'scher Notation $\sigma_{E_i} = [\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{zz} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{xz} \ \sigma_{xy}]$	MPa
σ	Spannungstensor, $\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$	MPa
σ_{HS}	Vektor der Hauptspannungen eines Spannungstensors σ , $\sigma_{HS}^T = [\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}]$	MPa
$\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$	Hauptspannungen des Spannungstensors σ	MPa
σ_{mean}	Mittlere Spannung des Spannungsvektors	MPa
σ_v	von-Mises-Vergleichsspannung	MPa
θ, φ	Winkel der Kugelkoordinaten	°
σ_{ij}	Komponente des Spannungstensor σ	MPa
Ω	Bauraum	-