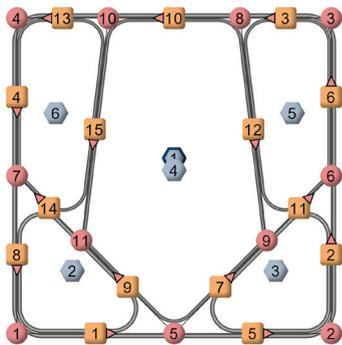


Graphen- und heuristikbasierte Topologieoptimierung von Profilstrukturen aus Faser-Kunststoff-Verbunden in Craschanwendungen

Bergische Universität Wuppertal
Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen

Dominik Schneider



**Graphen- und heuristikbasierte
Topologieoptimierung von Profilstrukturen aus
Faser-Kunststoff-Verbunden in
Crashanwendungen**

**Dissertation
zur Erlangung eines Doktorgrades**

in der
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
der
Bergischen Universität Wuppertal



vorgelegt von
Dominik Schneider
aus Velbert

Wuppertal 2022

Tag der mündlichen Prüfung 12.09.2022

Berichte aus dem Maschinenbau

Dominik Schneider

**Graphen- und heuristikbasierte Topologie-
optimierung von Profilstrukturen aus Faser-
Kunststoff-Verbunden in Craschanwendungen**

Shaker Verlag
Düren 2023

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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8884-7

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

Dominik Schneider

Graphen- und heuristikbasierte Topologieoptimierung von Profilstrukturen aus Faser-Kunststoff-Verbunden in Crashanwendungen

Dissertation, Bergische Universität Wuppertal,

Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik,

Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen, März 2022

Kurzfassung

Faserkunststoffverbunde bieten eine hohe spezifische Steifigkeit und je nach Belastung eine hohe spezifische Energieabsorption, was diese Materialien in Crashanwendungen zu interessanten Materialien machen kann, wenn niedrige Massen angestrebt werden. Durch das anisotrope Materialverhalten und mehrlagige Aufbauten mit verschiedenen Materialorientierungen, können die Strukturen individuell und belastungsgerecht ausgelegt werden. Es stellt sich jedoch die Frage, wie die aufwendigen Auslegungsprozesse unterstützt werden können, um die vielen Entwurfsfreiheiten in Crashanwendungen sinnvoll auszunutzen. Optimierungsmethoden können in vielen Bereichen eingesetzt werden, um konstruktive Prozesse zu unterstützen und die geeignetsten Topologien, Formen und Lagenaufbauten zu finden. In Crashanwendungen können die meisten Optimierungsmethoden jedoch nicht eingesetzt werden, oder nur in speziellen Teildisziplinen, da die Nichtlinearitäten in den Crashlastfällen den Einsatz von sensitivitätsbasierten Algorithmen unmöglich oder zu ressourcenintensiv machen. Die Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung wurde für die Optimierung der Topologie und Form von crashbelasteten Aluminiumstrangpressprofilen entwickelt. Diese Arbeit beschreibt die notwendigen Erweiterungen, um auch Faserverbundprofile optimieren zu können. Hierbei werden Mehrkammerprofilstrukturen behandelt, die aus einzelnen gewickelten und miteinander verklebten Profilen aufgebaut werden. Die Topologie des Profilquerschnitts und die Lagenaufbauten werden mit Heuristiken optimiert, die die Ergebnisse einer Crashesimulation auswerten und darauf aufbauend strukturelle Verbesserungen vorschlagen. Die Heuristiken werden für jedes Ausgangsdesign einer Iteration einzeln und in Konkurrenz zueinander aktiviert. Über mehrere aufeinanderfolgende Iterationen, in denen die jeweils besten Designs an die Folgeiteration übergeben werden, können komplexe Entwürfe entstehen.

Neben der Vorstellung der Geometriebeschreibung, der Erzeugung der Finite Elemente Modelle, der Heuristiken und des Optimierungsablaufs werden mehrere Anwendungsbeispiele vorgestellt, in denen verschiedene crashrelevante Strukturantworten unter Einhaltung verschiedener Restriktionen und Fertigungsrandbedingungen optimiert werden. Als Optimierungsziele werden Massen, Intrusionen und Maximalkräfte minimiert. Durch den Einsatz der Methodik können Faserverbundprofilstrukturen in Crashanwendungen ausgelegt werden und dadurch ein Beitrag geleistet werden, deren Einsatz zu erleichtern.

Stichworte:

Faserkunststoffverbunde, Wickelprofile, Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung, Crash, Lagenaufbau

Dominik Schneider

Graph and heuristic based topology optimization of profiles made of fiber reinforced plastic in crashworthiness applications

PhD thesis, University of Wuppertal, School of Mechanical Engineering and Safety Engineering, Chair for Optimization of Mechanical Structures, March 2022

Abstract

Fiber-reinforced plastic composites offer a high specific stiffness and, depending on the load, a high specific energy absorption, which makes them interesting materials for crash applications when low masses are desired. Due to the anisotropic material behavior and a wide range of options for the layer stack including the fiber orientations, the structures can be designed individually in accordance with the load. The question arises as to how engineers can be supported in the complex design process in order to make the most use of the design freedom in crash applications. Optimization methods can be used in many areas to support design processes and to find the most suitable topologies, shapes and layer stacks. However, in crash applications most optimization methods cannot be used or are limited to special disciplines, since the nonlinearities in the crash load cases make the use of sensitivity-based algorithms impossible or too resource-intensive. The Graph and Heuristic based Topology Optimization has been developed for optimizing the topology and shape of crash-loaded extruded aluminum profiles. This work describes the extensions necessary to optimize fiber composite profiles. Multi-chamber profile structures are treated, which are built up from individual profiles manufactured in a tape winding process and bonded together by adhesives. The topology of the profile cross-section and the layer stack are optimized using heuristics that evaluate the results of a crash simulation and suggest structural improvements based on these results. The heuristics are activated for each initial design of an iteration individually and in competition with each other. Over several successive iterations, in which the best designs are passed on to the subsequent iteration, complex designs can be created.

In addition to introducing the geometry description, the generation of the finite element models, the heuristics and the optimization process, several application examples are presented in which different crashworthiness structural responses are optimized under compliance with various restrictions and manufacturing constraints. The mass, intrusion and maximum force is minimized in several optimizations. By using the methodology, fiber composite profile structures can be designed in crash applications and thus a contribution to facilitate their use is made.

Keywords:

Fiber reinforced plastic, winding profile, Graph and Heuristic based Topology Optimization, crashworthiness, layer stack

Danksagung

Zuallererst möchte ich mich herzlich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Axel Schumacher bedanken. Durch die Chance, schon früh in meinem Studium (seit 2013) an seinem Lehrstuhl aktiv zu werden, wurde in mir der Forschungsdrang und die Begeisterung für die Strukturoptimierung geweckt. Er hat mir stets den Rücken freigehalten, sodass ich mich auf die Dissertation konzentrieren konnte. Auch bei thematischen Fragen stand er immer für fachlichen Austausch zur Verfügung. Er war mir ein Vorbild und hat mich in den vielen Jahren stark geprägt.

Ebenfalls möchte ich an dieser Stelle Sandra Plücker danken, die es durch ihr Engagement geschafft hat, mich fast vollständig aus bürokratischen Angelegenheiten herauszuhalten. Ohne Sie hätte ich wohl unzählige Stunden mit dem Ausfüllen von Anträgen und Formularen verloren.

Ich bedanke mich für die sehr gelungene Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe, die meine Dissertation sehr bereichert hat. Hier zu nennen sind Prof. Dr.-Ing. Joachim Hausmann, Dr.-Ing. Sebastian Schmeer, Alexander Huf und Dr.-Ing. Tobias Donhauser. Dank gilt hier ebenfalls der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die das Kooperationsprojekt „Entwicklung eines optimierungsgerechten Werkstoffmodells für die automatisierte Topologie- und Formfindung von Crashstrukturen aus thermoplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden“ (Schu 915/3-1) gefördert hat.

Am Lehrstuhl möchte ich zudem herzlich all meinen Kollegen danken, die mich schon viele Jahre begleiten. Zuerst zu nennen ist Simon Link, der für mich mittlerweile nicht nur ein Kollege, sondern auch ein guter Freund geworden ist. Für seine Zuverlässigkeit, seine Hilfsbereitschaft sowie seine fachliche Expertise bin ich sehr dankbar. Auch Dr.-Ing. Katrin Weider kenne ich nun seit vielen Jahren und danke ihr unendlich für ihre stete Hilfsbereitschaft. Ihr Wissen bei fachlichen Problemen scheint schier unbegrenzt, sodass sie mir bei Problemen immer weiterhelfen konnte. Auch danke ich Florian Beyer, Miriam Kick und Winnie Teichmann, die mein Vorhaben durch ihre Arbeiten und die gelungene Zusammenarbeit sehr bereichert haben.

Dank gilt außerdem meinen geschätzten Kollegen Philipp Clemens und Jens Trilling für die Anmerkungen zu meiner Dissertation, Fabian Plate für seine Unterstützung bei Videoübertragungen und Dr.-Ing. Sven Wielens für seine Tipps in der Endphase meiner Dissertation. Dank gebührt meinen ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Christopher Ortmann, der die Grundlagen für meine Arbeit geschaffen hat und mich in meiner Anfangszeit am Lehrstuhl eingearbeitet hat. Auch bei Dr.-Ing. Johannes Sperber und Dr. Andreas Hillebrand möchte ich mich bedanken, da die beiden mit ihrer Arbeit ebenfalls einen großen Beitrag für den Einsatz der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung leisten.

Außerdem möchte ich der gesamten externen Doktorandenrunde danken, die durch Diskussionen und einen fachlichen Austausch zum Erfolg meiner Dissertation beigetragen hat. Zuletzt danke ich meiner geliebten Familie, die mich immer unterstützt hat und für mich da war und so die Voraussetzung für meinen erfolgreichen akademischen Werdegang schuf.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Konzeption	2
2 Stand der Forschung	5
2.1 Strukturoptimierung im Allgemeinen	5
2.2 Topologieoptimierung von Crashstrukturen	6
2.3 Einsatz von Faserverbunden in Crashstrukturen	15
3 Geometriebeschreibung mit Graphen	20
3.1 Gründe für die Arbeit mit mathematischen Graphen	20
3.2 Syntax der Graphen	20
3.3 Graphenbasierte Fertigungsrestriktionen	26
3.3.1 Allgemeine Fertigungsrestriktionen	26
3.3.2 Restriktionen für Chambers	27
3.3.3 Restriktionen für den Lagenaufbau	30
4 Generierung der Finite Elemente Modelle.....	32
4.1 Automatisierte Modellerzeugung mit einem Präprozessor	32
4.2 Einschalige Modellierung des Lagenaufbaus	33
4.3 Mehrschalige Modellierung des Lagenaufbaus	34
4.4 Kontakte und Klebeelemente zwischen den Komponenten	36
4.5 Zuweisung der Faserorientierung	38
4.6 Modellierung zusätzlicher Verstärkungsschichten	39
4.7 Verschnitt der Profildenden mit einer vorgegebenen Fläche	41
5 Einsatz von Heuristiken zur Strukturverbesserung.....	43
5.1 Analyse der Simulationsdaten	43
5.1.1 Aufteilung der Simulationsdaten in ein regelmäßiges Raster	43
5.1.2 Auswertung des Rasters hinsichtlich der Deformation	49

5.1.3	Auswertung der vorliegenden Beanspruchungssituation	53
5.1.4	Einlesen von Elementkennwerten	60
5.2	Heuristiken zur Änderung der Topologie	61
5.2.1	Ausgleichen der Energiedichte	64
5.2.2	Entfernen unbelasteter Wände	65
5.2.3	Abstützen beulender Wände	66
5.2.4	Ausnutzen des Deformationsraums Zug/ Druck	67
5.2.5	Teilen langer Wände	68
5.2.6	Abstützen von Kammerrissen	69
5.3	Heuristiken zur Änderung des Lagenaufbaus	71
5.3.1	Aufdicken energiereicher Lagen	71
5.3.2	Entfernen unbelasteter Lagen	72
5.3.3	Anpassung der Lagenanteile	73
5.3.4	Ausgleichen der Energiedichte über alle Lagen	74
5.3.5	Anpassung der Faserorientierung	75
5.4	Ähnlichkeitsprüfung mit den existierenden Entwürfen	77
6	Optimierungsmethodik	79
6.1	Optimierungsablauf mit Aktivierung der Topologieheuristiken und Lagenaufbauheuristiken	79
6.2	Dimensionierung zur Bewertung der Heuristikentwürfe	82
6.3	Formoptimierung zur Verbesserung einzelner Entwürfe	83
6.4	Optimierungsalgorithmus Sequential Response Surface Method	86
6.5	Effiziente Dimensionierungsstrategie für sich wiederholende Optimierungen mit einer Designvariablen	87
6.5.1	Relevante Informationen aus vorhandenen Simulationen	87
6.5.2	Erstellung resultierender Metamodelle	93
6.5.3	Dimensionierungsprozess	99
6.5.4	Verwerfung schlechter Entwürfe	103
6.5.5	Vergleich der Dimensionierungsstrategien	109

6.6	Identifizierung von Entwürfen mit einem abweichenden Strukturverhalten	112
7	Anwendungsbeispiele Mehrkammerprofil	116
7.1	Beschreibung des Strukturmodells	116
7.2	Massenminimierung mit Verschiebungsrestriktion und mehreren Profillängen	119
7.3	Kraftminimierung mit Verschiebungsrestriktion und verschiedenen Dimensionierungsalgorithmen	132
7.4	Intrusionsminimierung mit konstanter Masse und verschiedenen Einstellungen für die Lagenaufbauheuristiken	135
8	Zusammenfassung und Ausblick	139
	Literaturverzeichnis	144

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BE	Heuristik <i>Balance Energy Density (Ausgleichen der Energiedichte)</i>
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DiESL	difference-based equivalent static load method
DL	Heuristik <i>Delete Needless Layers (Entfernen unbelasteter Lagen)</i>
DN	Heuristik <i>Delete Needless Walls (Entfernen unbelasteter Wände)</i>
ESLs	Equivalent Static Loads (Statische Ersatzlasten)
ESLSO	Equivalent Static Loads method for non-linear static response Structural Optimization
FE	Finite Elemente
FO	Heuristik <i>Fit Fiber Orientation (Anpassung der Faserorientierung)</i>
FR	Heuristik <i>Fit Fractions (Anpassung der Lagenanteile)</i>
FKV	Faserkunststoffverbund
GHT	Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung
HCA	Hybrid Cellular Automaton
HCATWS	Hybrid Cellular Automaton for thin-walled structures
ID	Identifikationsnummer
IVW	Leibnitz-Institut für Verbundwerkstoffe
LH	Heuristik LayerHCA (LagenHCA)
MMA	Method of Moving Asymptotes
SB	Heuristik <i>Support Buckling Walls (Abstützen beulender Wände)</i>
SC	Heuristik <i>Support Chamber Crack (Abstützen von Kammerrissen)</i>
SL	Heuristik <i>Split Long Walls (Teilen langer Wände)</i>
SP	Stützpunkt
SRSM	Sequential Response Surface Method
TCL	Tool Command Language
TL	Heuristik <i>Thicken Needed Layers (Aufdicken energiereicher Lagen)</i>
UC	Heuristik <i>Use Deformation Space Compression (Ausnutzen des Deformationsraums Druck)</i>
UT	Heuristik <i>Use Deformation Space Tension (Ausnutzen des Deformationsraums Zug)</i>

Lateinische Zeichen

a	Skalar
\underline{A}_{ax} ; \underline{A}_{lat} ; \underline{A}_n	Matrix mit den Krümmungsänderungen in axialer/ lateraler/ normaler Richtung des Rasters zwischen dem Start und Ende
ax	Axiale Laufvariable im Raster
b_E	Beulindex einer <i>Edge</i> des <i>Graphen</i>
b_{Tape}	Breite des eingesetzten Tapes
c_0, c_1, c_2	Koeffizienten eines Metamodells
c_{ax} ; c_{lat} ; c_n	Krümmungsänderung in axialer/ lateraler/ normaler Richtung des Rasters
\underline{C}_{ax} ; \underline{C}_{lat} ; \underline{C}_n	Matrix mit den Krümmungsänderungen in axialer/ lateraler/ normaler Richtung des Rasters
C	Kammerelement (<i>Chamber</i>) aus der Graphensyntax
d_{Druck}	Über die Zeit minimaler relativer Abstand zwischen zwei angegebenen Punkten
$d_{rel,ax}$; $d_{rel,lat}$	Relativer Abstand zu einem axialen/lateralen Nachbarfeld im Raster
$d_{rel,latRow}$	Relativer Abstand zwischen dem ersten und letzten Feld in lateraler Richtung einer Reihe im Raster
$d_{max c}$; $d_{min c}$	Größte/ kleinste relative, laterale Abstandsänderung in einer <i>Chamber</i>
$\underline{D}_{rel,ax}$; $\underline{D}_{rel,lat}$	Matrix mit den relativen Abständen zu den axialen/lateralen Nachbarfeldern im Raster
$\underline{D}_{rel,latRow}$	Matrix mit den relativen Abständen zwischen dem ersten und letzten Feld in lateraler Richtung aller Reihen des Rasters
d_{SPg^*}	Durchschnittlicher Abstand der Strukturantwort von den Stützpunkten <i>SP0</i> und <i>SP1</i> zur Restriktion g^*
d_{Zug}	Über die Zeit maximaler relativer Abstand zwischen zwei angegebenen Punkten
e	Index für einen Entwurf
E	Menge an Entwürfen
E	Kantenelement (<i>Edge</i>) aus der Graphensyntax
E_{ax} ; E_{lat} ; E_n	Ebene, die normal zur axialen/ lateralen/ normalen Richtung des Rasters steht
EL	Menge von Finiten Elementen
el	Elementindex
f	Wert der Strukturantwort/ Zielfunktion
f'	Steigung der Zielfunktion am Optimum
f^*	Approximierte Zielfunktion
f_{limit}	M_{ke} -beste Zielfunktion der vergangenen Dimensionierungen

fr	Anteil der Dicke am gesamten Lagenaufbau \mathbb{S}
fr^*	Korrigierter Anteil der Dicke am gesamten Lagenaufbau \mathbb{S}
$fr_{Lg} ; fr_{Lk}$	Anteil der Dicke der Lage L mit dem größten/ kleinsten Kennwert am gesamten Lagenaufbau \mathbb{S}
g	Ungleichheitsrestriktion
g^*	Approximierter Wert der restringierten Strukturantwort
\mathbb{G}	<i>Graph</i> , der die weiteren Graphenelemente beinhaltet
\vec{g}	Steigungsvektor der Restriktion
g_{limit}	Grenzwert der restringierten Strukturantwort
g'_{opt}	Mediansteigung der restringierten Strukturantwort an den approximierten Optima abgeschlossener Dimensionierungen
$g_{SP_0} ; g_{SP_1}$	Wert der restringierten Strukturantwort an dem Stützpunkt SP_0 / SP_1
g'_{SP}	Steigung der Restriktion zwischen den Stützpunkten
h	Index für eine Heuristik
$H ; H_T ; H_L$	Menge der Heuristiken (der Topologie-/ Lagenaufbauheuristiken)
i	Zähler der Iterationen der GHT, beginnend bei 0
I_{axBeulE}	Parameter zur Erfassung des lokalen axialen Beulens einer <i>Edge</i>
I_{latBeulE}	Parameter zur Erfassung des lokalen lateralen Beulens einer <i>Edge</i>
j	Index eines Experiments
$k_{\Delta x, j}$	Verhältnis aus der Entfernung zur optimalen Stelle zu der Entfernung der nächsten bestimmten Stützstelle mit 1 subtrahiert
L	Menge der betrachteten Lastfälle
l	Lastfallindex
\mathbb{L}	Eine Lage aus dem Lagenaufbau eines Graphenelements
lat	Laterale Laufvariable im Raster
l_{ax}	Länge eines Rasterfeldes in axialer Richtung
L_{ax}	Gesamtlänge des Rasters in axialer Richtung
L_{boxP}	durchschnittliches Maß der Box, die den Profilquerschnitt einschließt
l_{lat}	Länge eines Rasterfeldes in lateraler Richtung
LC_{axBiegE}	Lastkriterium für Biegung einer <i>Edge</i> in axialer Richtung
LC_{nBiegE}	Lastkriterium für Biegung einer <i>Edge</i> in der Ebene des Rasters
LC_{BiegC}	Lastkriterium für die Biegung einer <i>Chamber</i>
LC_{AxDruckE}	Lastkriterium für die axiale Druckbelastung einer <i>Edge</i>
LC_{AxDruckC}	Lastkriterium für die axiale Druckbelastung einer <i>Chamber</i>
LC_{latKompC}	Lastkriterium für laterale Kompression einer <i>Chamber</i>
LC_{lokBeulE}	Lastkriterium für lokales Beulen einer <i>Edge</i>
LC_{lokBeulC}	Lastkriterium für lokales Beulen einer <i>Chamber</i>
$LC_{\text{TorsE}} ; LC_{\text{TorsC}}$	Lastkriterium für die Torsionsbelastung einer <i>Edge/ Chamber</i>

$LC_{\text{ZugE}} ; LC_{\text{ZugC}}$	Lastkriterium für die axiale Zugbelastung einer <i>Edge/ Chamber</i>
m	Masse
m_i	Metamodell in der i -ten Iteration bei Verwendung der effizienten Dimensionierungsstrategie
$\max\text{Dist}_{\text{C}}$	Größter initialer Abstand im Querschnitt einer <i>Chamber</i>
N_{ax}	Anzahl der Felder eines Rasters in axialer Richtung
N_{Bieg}	Anzahl der <i>Edges</i> einer <i>Chamber</i> , die eine Biegung erfahren
N_{E}	Anzahl der <i>Edges</i> einer <i>Chamber</i>
$N_{\text{axBieg}} ; N_{\text{nBieg}}$	Anzahl der sich axial / in der Ebene biegenden <i>Edges</i> einer <i>Chamber</i>
N_{iov}	Anzahl der Iterationen ohne Verbesserung bis Optimierungsabbruch
N_{ke}	Anzahl der konkurrierenden Entwürfe
N_{lat}	Anzahl der Felder eines Rasters in lateraler Richtung
N_{SP}	Anzahl der Stützpunkte in einer Optimierung (Dimensionierung)
N_{t}	Anzahl der Zeitpunkte
N_{TapeL}	Anzahl der nötigen Tapebahnen, um in der angegebenen Lage eine vorgegebene Orientierung zu erreichen
O_{L}	Profilumfang einer Lage
\underline{P}	Koordinatenmatrix
\vec{p}	Koordinatenvektor
$p_{\text{L}} ; p_{\text{inner}} ; p_{\text{outer}}$	Abstand der Lage L , bzw. des innersten und äußersten Integrationspunktes von der Elementinnenfläche
\mathbb{P}	Das Profil, das durch den <i>Graphen</i> \mathbb{G} beschrieben wird
s	Wanddicke
Δs_{limit}	Maximal erlaubte Dickenänderung
Δs_{max}	Maximal angestrebte Dickenänderung
$s_{\text{alt}} ; s_{\text{neu}}$	Alte/ neue Wanddicke
SP_i	i -ter Stützpunkt der Dimensionierungsstrategie
\mathbb{S}	Der gesamte Lagenaufbau eines Graphenelements
t	Zeitindex
U	Innere Energie
u	Innere Energiedichte
$u_{\text{Lg}} ; u_{\text{Lk}}$	Energiedichte der Lage mit der größten/ kleinsten Energiedichte
\vec{v}	Geschwindigkeitsvektor
w	Gewichtung
x	Variable
\tilde{x}	Stelle, an der eine Gewichtung von 1 angenommen wird
$x_{\text{h}} ; x_{\text{l}}$	Oberer und unterer Grenzwert
x_{new}	Neue Stützstelle

Griechische Zeichen

α	Winkel bzw. Lagenorientierung
α_{ax} ; α_{lat} ; α_n	Winkeländerung in axialer/ lateraler/ normaler Richtung des Rasters zwischen dem Start und Ende
β	Anteil der noch nicht gelöschten Finiten Elemente im Rasterfeld
ε_i	Dehnungskomponente
$\varepsilon_{\mathbb{L}}$	Dehnung der Lage \mathbb{L}
ε_{inner} ; ε_{outer}	Dehnung des innersten und äußersten Integrationspunktes
ρ	Dichte
σ_i	Spannungskomponente
φ_E ; φ_P	Torsionswinkel einer <i>Edge</i> / des gesamten Profils

Operatoren

$\nabla_{x_1}^{x_h}(x)$	Gibt 1 zurück für $x \geq x_h$, 0 für $x \leq x_1$ und interpoliert dazwischen linear zwischen 1 und 0
$\Delta_{x_1}^{x_h}(x)$	Gibt 0 zurück für $x \geq x_h$, 1 für $x \leq x_1$ und interpoliert dazwischen linear zwischen 0 und 1
\bar{x}	Es wird das arithmetische Mittel des Vektors oder der Matrix gebildet. Wenn bei der Benutzung angegeben, kann die zeitliche Dimension eine linear interpolierte Gewichtung zwischen 0 und 1 vom ersten zum letzten Zeitpunkt erhalten
\check{x}	Es wird ein gewichtetes arithmetisches Mittel gebildet, bei dem der erste Zeitpunkt eine Gewichtung von 0 erhält, der letzte eine Gewichtung von 1 und dazwischen wird mit einem steigenden Polynom 4. Grades die Gewichtung interpoliert
\tilde{x}	Es wird der Medianwert des Vektors oder der Matrix gebildet
\hat{x}	Normierter Wert
$ X $	Anzahl der Elemente in der Menge X
\sphericalangle	Winkel zwischen zwei Vektoren
$\vec{p} E$	Projektion des Vektors \vec{p} auf die Ebene E
$\sigma(\bar{x})$; $\sigma(X)$; $\sigma(\underline{X})$	Standardabweichung der übergebenen Werte (Vektor/ Menge/ Matrix)
$\sigma_t(\underline{X})$	Standardabweichung der Werte eines Zeitpunkts t einer Matrix

Vektoren werden mit einem Pfeil über einem kleinen lateinischen Buchstaben und Matrizen durch eine Unterstreichung bei einem großen lateinischen Buchstaben dargestellt.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Faserkunststoffverbunde (FKV) weisen auf die Masse bezogen eine hohe Steifigkeit und Festigkeit auf und bieten dadurch ein großes Leichtbaupotential. Besonders thermoplastische FKV stehen im Fokus künftiger Anwendungen, da sie im Gegensatz zu Verbunden mit einer duroplastischen Matrix schweißbar und recyclebar sind und gleichzeitig kürzere Zykluszeiten während der Herstellung aufweisen. Als weiterer Vorteil können sie in einem Verarbeitungsschritt mit Spritzgussstrukturen kombiniert werden. Durch ihre verschiedenen Energieabsorptionsmechanismen können FKV bei einer Druckbelastung effektiver Energie absorbieren als Metalle. Letztere wandeln die kinetische Energie hauptsächlich durch plastische Deformation in Form von Faltenbildung um. FKV-Strukturen weisen hingegen folgende Mechanismen auf:

- Faserzugversagen und Faserdruckversagen
- Matrixzugversagen und Matrixdruckversagen
- Schubversagen
- Reibung

Das anisotrope Material einer FKV-Struktur bietet über den Lagenaufbau und die Orientierung vielfältige Auslegungsfreiheiten. Dies bedeutet jedoch auch einen größeren Auslegungsaufwand. Besonders in der Automobilindustrie erschweren Anforderungen an die passive Sicherheit für Unfallszenarien diesen Auslegungsprozess. Hierbei gibt es zwei Hauptaufgaben, die erfüllt werden sollen. Im Bereich der Fahrgastzelle sollen Strukturen intakt bleiben und Eindringungen möglichst vermieden werden. In anderen Bereichen, wie der Knautschzone, soll die Energie eines Unfalls durch Deformation, Reibung oder Materialversagen absorbiert werden. Hierbei dürfen bestimmte Kraftniveaus nicht überschritten werden, einerseits um Bauteile nicht zu gefährden, die den Überlebensraum des Insassen sicherstellen und andererseits um im Fall von Unfällen mit niedriger Geschwindigkeit dahinterliegende Karosserieteile möglichst wenig zu beschädigen, um die resultierenden Reparaturkosten möglichst niedrig zu halten. Zudem hängen auch die Beschleunigungen, die die Insassen während eines Verkehrsunfalls erfahren, von den Kraftniveaus ab und beeinflussen somit direkt das Verletzungsrisiko. Die Auslegung solcher Strukturen unter Verwendung aller Freiheitsgrade ist somit relativ komplex und ohne automatische Verfahren kaum leistbar.

In linearen statischen Anwendungen können Werkzeuge der Strukturoptimierung (Schumacher 2013) im Bauteilentwicklungsprozess eingesetzt werden, um z. B. in der frühen Konzeptfindungsphase erste Entwürfe zu generieren. Hierbei werden unter anderem möglichst leichte oder steife Strukturen angestrebt, die händisch nicht oder nur mit einem erheblichen

Aufwand ausgelegt werden können. In dem Prozess wird zumeist, basierend auf analytischen Sensitivitäten, für jeden Bereich eines Entwurfsraums iterativ entschieden, ob an der jeweiligen Stelle mehr oder weniger Material eingebracht werden soll. Aus den entstehenden Strukturen können im Anschluss Bauteilvorschläge abgeleitet werden.

Für nichtlineare Crashanwendungen existieren derzeit jedoch keine analytischen oder semi-analytischen Sensitivitäten, die alle Nichtlinearitäten (z. B. Kontakt, Versagen, Anisotropie, Dehnratenabhängigkeit, Plastizität, große Deformationen) gleichzeitig berücksichtigen können. Dies verhindert den Einsatz der aus der Topologieoptimierung für lineare statische Anwendungen bekannten Verfahren. Zusätzlich sind die Strukturantworten von Crashstrukturen zumeist hochgradig nichtlinear, was zusätzliche Anforderungen an die Optimierungsalgorithmen stellt.

Für die Optimierung von crashbelasteten Strangpressprofilen wurde deshalb die Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung (GHT) entwickelt (Ortmann und Schumacher 2013; Ortmann 2015; Ortmann et al. 2021). In der Methode werten Heuristiken die Simulationsdaten aus und schlagen darauf aufbauend Änderungen an der Topologie einer Profilstruktur vor, um das strukturmechanische Verhalten zu verbessern. In der Literatur beschränkt sich die Optimierung von crashrelevanten FKV-Strukturen bisher hauptsächlich auf manuelle Änderungen der Form (Belingardi et al. 2013b) oder des Lagenaufbaus (Zhang et al. 2018). Um auch für FKV die Topologieoptimierung in Crashanwendungen zu ermöglichen, soll in diesem Promotionsvorhaben die GHT dahingehend erweitert werden, dass die Methodik auch bei FKV-Profilstrukturen mit konstantem Querschnitt eingesetzt werden kann. Neben der Topologie und der Form soll hierbei auch der Lagenaufbau für die vorhandene Belastungssituation optimiert werden. Die Arbeiten dieser Promotion bauen auf dem Programmcode auf, der in dem Promotionsvorhaben „Entwicklung eines graphen- und heuristikbasierten Verfahrens zur Topologieoptimierung von Profilquerschnitten für Crashlastfälle“ (Ortmann 2015) entwickelt wurde. Der Programmcode wurde in vielen Bereichen neu programmiert, unter anderem um eine flexiblere Erweiterung für neue Anwendungsgebiete mit den dafür nötigen Anpassungen an den Geometriebeschreibungen zu erlauben und um interne Optimierungsalgorithmen implementieren zu können. In dem folgenden Abschnitt wird der Aufbau der Dissertation und die Anpassungen, die für die Optimierung von FKV-Profilen notwendig sind, vorgestellt.

1.2 Zielsetzung und Konzeption

In dieser Arbeit soll die GHT erweitert werden, um optimale Lagenaufbauten, Formen und Topologien (Lage und Anordnung) für crashrelevante Profilstrukturen aus FKV zu finden. Um die Qualität der in der Optimierung verwendeten Materialmodelle und somit auch die Vorhersagegüte zu erhöhen, gliedert sich das Promotionsvorhaben in das Projekt „Entwicklung eines optimierungsgerechten Werkstoffmodells für die automatisierte Topologie- und Formfindung von Crashstrukturen aus thermoplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden“ ein,

welches durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert wird (DFG-Projekt Schu 915/3-1). In Kooperation mit dem Institut für Verbundwerkstoffe (IVW) in Kaiserslautern soll dabei ein Werkstoffmodell entwickelt werden, das die Belange der Topologieoptimierung berücksichtigt, wobei das IVW sich schwerpunktmäßig mit der Werkstoffmodellierung auseinandersetzt und die Bergische Universität Wuppertal mit der Topologieoptimierung der Crashstrukturen, also dem Thema der hier vorliegenden Arbeit. Als angestrebtes Fertigungsverfahren soll das Tapewickelverfahren dienen. Bei diesem werden faserververstärkte Tapes mit einer thermoplastischen Matrix auf einen Kern gewickelt, um ein einzelnes geschlossenes Profil zu erhalten. Der Kern wird nach dem Wickeln entfernt. Um komplexere Querschnitte zu ermöglichen, werden im Anschluss mehrere dieser Profile miteinander verklebt und nochmals mit zusätzlichen Tapelagen umwickelt. Das Verfahren wird ausgewählt, da es die Herstellung von Versuchskörpern in geringen Stückzahlen mit niedrigen Werkzeugkosten für Demonstratoren erlaubt. Die **Abbildung 1-1** veranschaulicht das Konzept einzelne Profile zu wickeln (hier bei der Firma AFPT¹), diese danach miteinander zu verkleben und im Anschluss nochmal optional zu umwickeln.

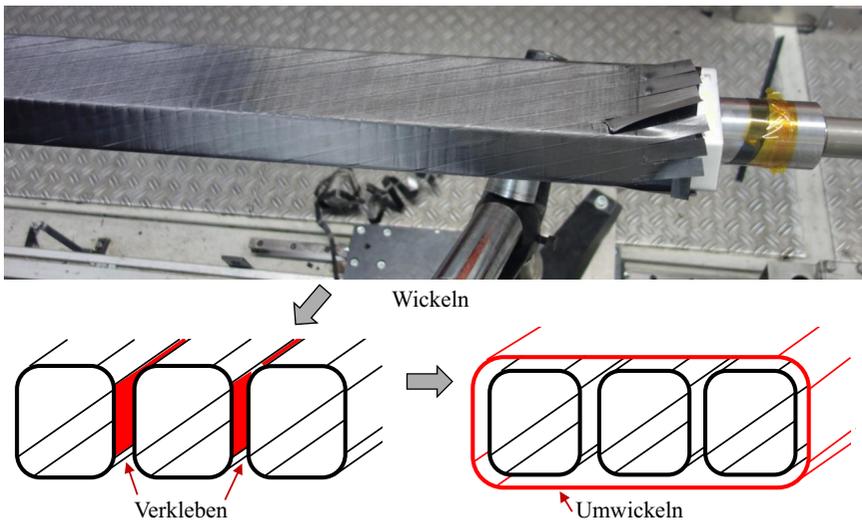


Abbildung 1-1: Fertigungsansatz, mit einem Foto des Tapewickelvorgangs eines quadratischen Profils (Quelle: AFPT), gefolgt von einer Skizze der Verklebung mehrerer Profile und einer möglichen Umwicklung des verklebten Profilverbunds

¹ AFPT GmbH, Webseite: <https://global.afpt.de/>

Um die Geometrie und den Lagenaufbau solch gewickelter Profilverbunde beschreiben zu können, muss der mathematische *Graph* erweitert werden, der in der GHT genutzt wird, um diese Informationen für jeden Entwurf separat zu speichern. Hierbei werden sowohl die Verwindungen der einzelnen Profile, als auch die äußeren Tapelagen, die um den gesamten Verbund gewickelt sind, in dem *Graphen* abgebildet. Vor den Simulationen der FKV-Strukturen wird der *Graph* automatisch in ein FE-Modell überführt. Hierbei werden die Materialorientierungen definiert und alle nötigen Kontakte und Klebeverbindungen. Um während einer Simulation Delamination, also das Auftrennen angrenzender Schichten, abbilden zu können, muss ein Profil mit mehreren verbundenen Elementschalenschichten modelliert werden, die sich bei einer entsprechenden Belastung trennen können.

Da das Versagen bei FKV ein wichtiger Bestandteil des Energieabsorptionsmechanismus ist, muss die Methode bei der Simulationsdatenauswertung damit umgehen können. Die Heuristiken, die die Simulationsdaten auswerten und darauf basierend Änderungen an der Struktur vorschlagen, müssen mit mehreren Schalenelementlagen arbeiten können. Eine spezielle Heuristik widmet sich dem Elementversagen, um die strukturelle Integrität nach einem großflächigen Versagensereignis durch eine topologische Änderung zu stärken. Fertigungsrestriktionen gewährleisten, dass die vorgeschlagenen Entwürfe mit dem Tapewickelverfahren hergestellt werden können. Da der Lagenaufbau für das strukturmechanische Verhalten einer FKV-Struktur entscheidend ist, wird dieser neben der Topologie während der Optimierung durch die Heuristiken beanspruchungsgerecht angepasst.

Als Einstieg in diese Arbeit, wird in Kapitel 2 der Stand der Forschung vorgestellt. In Kapitel 3 wird die Syntax der mathematischen *Graphen* beschrieben, mit der die Tapewickelprofile beschrieben werden können. Außerdem werden hier die internen Fertigungsrestriktionen vorgestellt, die die Herstellbarkeit aller Entwürfe gewährleisten. Danach folgt in Kapitel 4 die Beschreibung der automatischen Erzeugung der Finite Elemente (FE) Modelle, die aus dem *Graphen* abgeleitet werden. In Kapitel 5 wird erklärt, wie die Simulationsdaten für die Heuristiken aufbereitet werden und wie die einzelnen Heuristiken die Änderungen an der Topologie oder an dem Lagenaufbau vorschlagen. Das folgende Kapitel 6 stellt die Optimierungsmethodik mit ihrem Ablauf allgemein vor und geht auf die verwendeten Optimierungsalgorithmen ein. In Kapitel 7 werden verschiedene Optimierungsbeispiele vorgestellt, die die Einsatzfähigkeit der Methode aufzeigen und den Einfluss verschiedener Profillängen, Dimensionierungsstrategien und Heuristikeinstellungen darstellen. Zuletzt werden in Kapitel 8 die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick für weitere mögliche Anpassungen gegeben.

2 Stand der Forschung

2.1 Strukturoptimierung im Allgemeinen

Die Strukturoptimierung hat das Ziel, das mechanische Verhalten von Strukturen für eine gegebene Problemstellung zu verbessern. Zur Einführung in die Thematik, werden Informationen aus dem Buch *Optimierung mechanischer Strukturen* (Schumacher 2013) im folgenden Abschnitt zusammengefasst.

So braucht man für jede Optimierung ein Modell des mechanischen Verhaltens, um einen Entwurf aus dem Designraum bewerten zu können. Hierfür eignen sich analytische Funktionen, sogenannte Metamodelle, die aus vorhandenen Datenpunkten eine Approximation aufbauen oder numerische Methoden, wie die Finite Elemente Methode, in der das Strukturverhalten eines Bauteils für verschiedene Anwendungsgebiete simuliert werden kann. Für jede Aufgabenstellung bzw. jedes Optimierungsproblem ist es erforderlich das zu verfolgende Ziel zu formulieren. Dieses muss dabei von den definierten Entwurfsvariablen abhängen, damit eine Verbesserung erreicht werden kann. In der Regel werden Optimierungsprobleme so gewählt, dass eine Zielfunktion minimiert wird. Da jede Maximierung durch eine Minimierung der negativen Zielfunktion ausgedrückt werden kann, können damit trotzdem alle Ziele verfolgt werden. Zusätzlich können Restriktionen definiert werden, die z. B. Mindestanforderungen an strukturmechanische Eigenschaften definieren oder geometrische Einschränkungen vorgeben. Die Einhaltung der Restriktionen wird in den Optimierungen bei der Verfolgung des Ziels berücksichtigt. Die Anpassung der Entwurfsvariablen erfolgt über einen Optimierungsalgorithmus. Basierend auf einem Ausgangsentwurf schlägt der Algorithmus so lange iterativ Änderungen der Entwurfsvariablen vor und wertet das geänderte Strukturverhalten aus, bis ein Abbruchkriterium erreicht wird. Bei letzterem kann es sich z. B. um eine relativ ineffiziente Festlegung der maximalen Iterationsanzahl handeln oder eine minimale Verbesserung, die von Iteration zu Iteration erreicht werden muss.

In der Strukturoptimierung existieren verschiedene Hauptaufgabengebiete. Topologieoptimierungen verändern die Anzahl und Anordnung von strukturellen Elementen. Formoptimierungen verändern die Geometrie eines vorhandenen Bauteils ohne neue Strukturelemente oder Hohlräume einzubringen oder zu entfernen. Dimensionierungen variieren vor allem Wanddicken und Querschnittsgrößen. Zuletzt kann eine Optimierung auch dazu genutzt werden, ein Material bzw. bei anisotropen Materialien deren Ausrichtung auszuwählen sowie die generelle Art der Bauweise. Oft werden mehrere Aufgabengebiete in einer Optimierung kombiniert und somit gleichzeitig betrachtet.

Für die Anpassungen der Entwurfsvariablen können je nach konkretem Optimierungsproblem unterschiedliche Optimierungsalgorithmen Anwendung finden. Gradientenbasierte Algorithmen können dann eingesetzt werden, wenn analytische Sensitivitäten der Strukturantworten

in Abhängigkeit von den Entwurfsvariablen vorhanden sind oder mit wenig Aufwand bestimmt werden können. Als Beispiel verwendet die Methode des steilsten Abstiegs die Gradienten, um eine Suchrichtung im mehrdimensionalen Entwurfsraum zu bestimmen, in der die Zielfunktion den steilsten Abstieg zeigt. In dieser Richtung wird im Anschluss eine eindimensionale Optimierung durchgeführt. Stehen die analytischen Sensitivitäten nicht zur Verfügung, kann eine Versuchsreihe ausgewertet werden und mit den Daten ein Metamodell aufgebaut werden. Hierbei sollten deutlich mehr Versuche ausgewertet werden als Designvariablen vorhanden sind, damit eine ausreichende Vorhersagegüte des Metamodells erreicht werden kann. Dadurch ist dieses Vorgehen auf eine begrenzte Anzahl an Designvariablen beschränkt, da die nötige Anzahl an Stützstellen sonst sehr stark ansteigt. Auf diesem Metamodell können die Gradienten wieder effizient bestimmt werden und die Strukturantworten der weiteren Stützstellen approximiert werden. Gerade bei Problemen, in der das Optimierungsproblem oder eine zugehörige globale Approximation viele lokale Minima aufweist, können gradientenbasierte Algorithmen schnell in schlechten lokalen Minima landen und stecken bleiben. Bei solchen Problemen können stattdessen stochastische Optimierungsalgorithmen eingesetzt werden, die zwar deutlich mehr Funktionsaufrufe benötigen, dafür den Entwurfsraum großflächiger abtasten und darum schlechte lokale Minima überspringen können. Als Algorithmen werden beispielsweise Evolutionsalgorithmen oder genetische Algorithmen eingesetzt, die durch Mutationen (Veränderungen am Entwurfsvektor), Selektion (Auswahl aus Entwurfsvektoren) und Rekombinationen (Beteiligung der Entwurfsvektoren früherer Generationen) biologische Evolutionsprozesse nachbilden. Basierend auf Ausgangs- bzw. Elternentwürfen werden hier mehrere Nachkommen durch Mutationen der Elternentwurfsvektoren gewonnen. Diese werden im Anschluss ausgewertet und die besten Entwürfe ausgewählt und rekombiniert, um eine neue Elterngeneration zu bilden und den Prozess zu wiederholen.

2.2 Topologieoptimierung von Crashstrukturen

Da in dieser Arbeit die Topologie von FKV-Profilen in crashrelevanten Anwendungen optimiert werden soll, wird in diesem Abschnitt im konkreten auf die Topologieoptimierung von Crashstrukturen eingegangen. Ortman (2015) nennt zwei Aufgaben von Crashstrukturen:

- Gewährleistung der Strukturellen Integrität der Fahrgastzelle, um den Überlebensraum der Insassen zu sichern
- Absorption der kinetischen Energie

Bei Letzterem ist es wichtig, dass die Absorption bzw. Umwandlung der Energie in Anwesenheit eines Insassen so erfolgt, dass dessen Körper keine zu großen Beschleunigungen und Kräfte erfährt. Um geeignete Strukturen zu finden, die diese Aufgaben erfüllen, sollen Methoden zur Topologieoptimierung eingesetzt werden. Duddeck et al. (2016) geben als nötige Aspekte für die Optimierung von crashrelevanten Strukturen an:

- Modellierung mit Schalenelementen, um das Verhalten von dünnwandigen Strukturen abbilden zu können
- Verwendung eines Ziels, das ungleichmäßige Energiedichteverteilungen innerhalb der Strukturen erlaubt
- Eine Unterscheidung zwischen der Optimierung von Energieabsorptionsstrukturen und Strukturen die einer Intrusion entgegenwirken sollen
- Verwendung von Crash-Simulationen, da sich Strukturen unter Crashlasten anders verhalten als unter statischen Lasten

Über diese Auflistung hinaus, müssen jedoch noch weitere Punkte ergänzt werden, um eine hohe Optimierungsqualität zu gewährleisten:

- Die Wahl des Startentwurfs sollte keinen erheblichen Einfluss auf die Optimierungsergebnisse haben
- Die Methoden sollten in der Lage sein, schlechte lokale Optima übergehen zu können, da wegen der zahlreichen Nichtlinearitäten eine Vielzahl an lokalen Optima im Designraum existiert
- Die gewonnenen Strukturen sollen leicht interpretierbar sein und die Fertigungsrestriktionen erfüllen, da aufwendige nachträgliche Interpretationen zu einem anderen strukturell-mechanischen Verhalten führen können

Für lineare statische Modelle mit elastischen Materialien und kleinen Deformationen gibt es viele kommerziell eingesetzte Topologieoptimierungsverfahren, die von Bendsoe und Sigmund (2003) zusammengetragen werden. Vielfältig eingesetzt wird demnach die Dichtemethode, die jedem Element im Designraum eine Dichte zwischen 0 und 1 zuweist, wobei 0 einem Leerraum entspricht und 1 Vollmaterial. Bei vorhandenen Zwischendichten werden die Materialeigenschaften in Abhängigkeit von der relativen Dichte angepasst. Als Zusammenhang wird oft der SIMP-Ansatz (solid isotropic material with penalization) gewählt, der die Materialeigenschaften von Elementen mit Zwischendichten bestraft. Dadurch bilden sich nur wenig Elemente mit Zwischendichten in der Struktur aus und es wird eine Verteilung von Vollmaterial und Leerraum angestrebt.

Die Sensitivitäten der Elementdichten können für Optimierungsziele, wie die Minimierung der Compliance, ohne großen Aufwand analytisch bestimmt werden, sodass z. B. die Method of Moving Asymptotes (MMA) (Svanberg 1987) als Approximation eingesetzt werden kann, um die Struktur mit einer Vielzahl an Designvariablen und einigen Restriktionen zu optimieren. Durch die Umverteilung des Materials ändert sich während der Optimierung die Topologie und Form der Struktur.

Die Optimierung von Craschanwendungen gestaltet sich deutlich komplexer, da die analytischen Sensitivitäten für die gradientenbasierten Algorithmen wegen der deutlich größeren Modellierungsvielfalt und -komplexität nicht mehr so leicht bestimmt werden können. So können Crashsimulationen Bifurkationspunkte und zahlreiche Nichtlinearitäten beinhalten:

- Nichtlineares Materialverhalten (Plastizität, Materialversagen & -schädigung, Dehnratenabhängigkeit)
- Geometrische Nichtlinearitäten (Große Verformungen, Nachknickverhalten, Nachbeulverhalten, Nachkipverhalten, Durchschlagsphänomene)
- Nichtlineare Randbedingungen (Kontakt)

Bei der Anwesenheit solcher Nichtlinearitäten die Sensitivitäten analytisch zu ermitteln ist ein aktuelles Forschungsfeld und derzeit nur mit Einschränkungen möglich. Je nach Ansatz werden z. B. Trägheiten, Zeitabhängigkeiten oder Kontakte nicht berücksichtigt, um das Problem zu vereinfachen.

Ivarsson et al. (2018) stellen einen gradientenbasierten Topologieoptimierer vor, der auf der Dichtemethode aufbaut und bei transienten (instationären), viskoplastischen Modellen mit endlicher Dehnung eingesetzt werden kann. Sie ermitteln für ihren Fall eine analytische Beschreibung der Sensitivitäten und können dadurch effizient Optimierungsalgorithmen einsetzen. Ihr Ziel ist es Topologien zu finden, die die Energieaufnahme maximieren. Sie stellen verschiedene Beispiele mit unterschiedlichen Belastungsraten vor, in denen sich Effekte der Dehnratenabhängigkeit und der Trägheit auf die Topologie auswirken. So lagert sich z. B. durch eine Variation der Dichten, Material bei großen Belastungsraten nahe der aufgebrachten Last an. In einem weiteren Beispiel zeigen sie, dass ihre Methode auch bei größeren Deformationen noch funktioniert.

Weider (2021) stellt die sogenannte Topologische Ableitung unter Materialnichtlinearität, großer Verformung und Zeitabhängigkeit vor. Diese Topologische Ableitung ist eine Sensitivität, die angibt, wie sich eine Funktion durch das Einbringen einer Aussparung verändert. Der Zusammenhang zwischen Funktion und Entwurfsraum wird mit der adjungierten Methode (Weider und Schumacher 2019) hergestellt. Bei der Sensitivitätenberechnung verbleiben Integralterme, die erst durch eine Linearisierung des effektiven Materialverhaltens, das durch die plastische Dehnung und die isotrope Verfestigung entsteht, gelöst werden können. Für die Funktionen einer Einzelpunktverschiebung und der inneren Energie, werden die Sensitivitäten anhand von Beispielen plausibilisiert. Anwendung kann die Topologische Ableitung im von Weider und Schumacher (2018) vorgestellten Optimierungsschema finden. Darin werden iterativ Bereiche aus dem Designraum gelöscht, die eine geringe Sensitivität haben. Durch ein Projektions- und Filterschema können hochsensitive Bereiche des Entwurfsraums wieder zurückkehren.

Trotz des vorgestellten Fortschritts sind die beiden Methoden und viele der folgend vorgestellten Verfahren noch nicht in der Lage, dünnwandige Crashstrukturen zu optimieren, wie sie z. B. im Fahrzeug vorkommen. Einerseits fehlt die Berücksichtigung von Kontakten, mit denen Lasten innerhalb einer Komponente aber auch zwischen Komponenten übertragen werden können. Andererseits kann die Optimierung ohne die Berücksichtigung von Materialversagen zu Strukturen führen, die lokal versagen und die Strukturelle Integrität verlieren. Zuletzt ermöglicht die Art der Modellierung mit Volumenelementen bei vielen Ansätzen kein

feines Faltenbeulen der Struktur, was für Schalenstrukturen ein entscheidender Energieabsorptionsmechanismus ist.

Die alternative Möglichkeit, Gradienten in einer Topologieoptimierung mit vielen Designvariablen z. B. über numerische Differentiation zu bestimmen, indem eine zusätzliche Simulation mit variiert Designvariable berechnet wird, ist nicht zielführend. Einerseits können die Strukturantworten numerischem Rauschen unterliegen, was die Bestimmung der Gradienten erschwert (Fang et al. 2017). Andererseits ist es sehr ressourcenintensiv, die Gradienten mit zusätzlichen Simulationen zu bestimmen und somit höchstens für sehr kleine Anzahlen an Designvariablen z. B. in einer Dimensionierung geeignet.

Im Kontrast dazu stellt Pedersen (2003, 2004) einen Ground Structure Approach vor, um Konzeptideen für ebene Rahmenstrukturen in Craschanwendungen zu finden. Als Grundstruktur dient ein Raster aus Knoten, welche mit Balken verbunden sind. Die Balken können knicken und sich plastisch deformieren (als plastisches Fließgelenk (Pedersen 2003) bzw. plastische Zone (Pedersen 2004)), jedoch keine axiale Stauchung z. B. in Form von Faltenbeulen aufweisen. In den Optimierungen wird die Höhe der Balken basierend auf analytischen Zusammenhängen in vorgegebenen Grenzen variiert, um die Reaktionskräfte an einen vorgegebenen Kraftverlauf anzunähern, der durch einzelne Designpunkte beschrieben wird. Die Balken werden aus der Struktur entfernt, wenn sie in mehreren aufeinanderfolgenden Iterationen die minimale Querschnittsfläche aufweisen. Die optimierten Ergebnisse erreichen in einfachen Beispielen Kraftverläufe, die um wenige Prozent von dem geforderten Kraftverlauf abweichen. Die Optimierungsergebnisse hängen von der initial gewählten Grundstruktur ab, da sich keine neuen Balken in der Struktur ausbilden können. Da Kontakte in der Methodik noch nicht einsetzbar sind, treten bei großen Deformationen zwangsläufig unphysikalische Durchdringungen auf. Dies erschwert den Einsatz bei Problemstellung mit großen Deformationen. In den impliziten Simulationen werden außerdem Trägheiten der Struktur selber sowie Dehnratenabhängigkeiten nicht berücksichtigt. Da für das Material lediglich Werte für den Elastizitätsmodul, die Streckgrenze und einen Verhärtungsfaktor eingegeben werden können, sind komplexe Materialverhalten sowie Versagen nicht abbildbar. Zuletzt kann das Verfahren in einem schlechten lokalen Optimum landen, da es keine Möglichkeit gibt, aus diesem herauszukommen. Durch die Verwendung von analytischen Sensitivitäten ist die Methode sehr ressourceneffizient und kann schnell erste Konzeptideen liefern.

Huang et al. (2007) setzen die bidirektionale evolutionäre Strukturoptimierung in der Topologieoptimierung ein, um die Energieabsorption verschiedener Strukturen bei einer vorgegebenen Verschiebung zu optimieren, ohne dabei eine zulässige maximale Kraft zu überschreiten. In den vorgestellten Beispielen wird der Designraum mit bilinearen 2D-Elementen vernetzt. Der Algorithmus entfernt an den Stellen Material, wo es für das Optimierungsziel ineffizient ist und fügt das Material in den Elementen hinzu, wo es gebraucht wird. Als Entscheidungskriterium wird die absorbierte Energie pro Volumen oder das Verhältnis der absorbiert-

ten Energie zur theoretisch idealen absorbierten Energie herangezogen. Die nötigen Sensitivitäten werden in nichtlinearen FE-Simulationen gewonnen, in denen die Struktur belastet wird, bis die zulässige Deformation erreicht ist. Ein Filter verhindert dabei die Entstehung von zu filigranen Strukturen. Die Methode wird an zwei Beispielen mit Balken angewendet, die an den Seiten gelagert bzw. eingespannt sind und in der Mitte eine vorgegebene maximale Verschiebung erfahren. Durch den Einsatz der Methode wird die Energieabsorption der Strukturen erhöht, sie weisen jedoch keinen konstanten Kraftverlauf auf, sondern eine in weiten Teilen mit der Deformation zunehmende Kraft, die als Maximum die vorher definierte zulässige Kraft erreicht. Dies bedeutet entweder, dass das globale Optimum nicht erreicht wurde oder in den gewählten Beispielen aus mechanischen Gründen kein optimaler, annähernd konstanter Kraftverlauf erreicht werden kann. Es wird nicht beschrieben, ob dehnratenabhängige Effekte, Materialversagen und Kontakte in der Methodik berücksichtigt werden können.

Park (2010) beschreibt als weiteres Verfahren die *Equivalent Static Loads method for non linear static response Structural optimization* (ESLSO). Der Grundgedanke ist, z. B. eine Crashsimulation in ein lineares statisches Problem zu überführen, damit gängige Methoden zur Optimierung angewendet werden können. Um dies zu erreichen, werden in einem ersten Schritt die Verschiebungen aus einem Crashlastfall extrahiert. Dann werden diejenigen statischen Ersatzlasten (ESLs) bestimmt, die in einem linearen statischen Lastfall die gleichen Deformationen herbeiführen, wie die zuvor Extrahierten. Errechnet werden die ESLs indem die lineare Steifigkeitsmatrix mit den Verschiebungen multipliziert wird. Um das Verhalten während des Crashes besser erfassen zu können, können ESLs für mehrere Zeitpunkte der Crashsimulation bestimmt werden. Die ESLs können im Anschluss in einer Optimierung verwendet werden, um ein neues Design zu generieren. Die ESLs der verschiedenen Zeitpunkte der Crashsimulation werden dabei als eigene Lastfälle behandelt. In der Dimensionierung oder Topologieoptimierung können dann gängige Verfahren wie die MMA in Verbindung mit einem dualen Optimierungsalgorithmus (Fleury 1989a, 1989b) eingesetzt werden. Der neu gewonnene Entwurf wird in einer Crashberechnung simuliert und die ESLs werden aktualisiert. Die beiden Schritte aus Aktualisierung der ESLs und Optimierung mit den ESLs werden iterativ wiederholt, bis die Methode konvergiert. Park (2010) erwähnt, dass ESLs anstatt für Verschiebungen auch für Spannungen, Dehnungen und die Deformationsenergie bestimmt werden können. Weiter gibt er die Einschränkung an, dass nur Optimierungsziele und Restriktionen aktiv verfolgt werden können, die in den statischen Simulationen definiert werden können. So wird z. B. in einem vorgestellten Beispiel nach der Optimierung eine Geschwindigkeitsrestriktion nicht eingehalten, da diese in der Optimierung mit den statischen Ersatzlasten nicht berücksichtigt werden kann. Witowski et al. (2012) geben an, dass aus der Linearisierung des Optimierungsproblems und der Aufteilung des dynamischen Vorgangs in statische Vorgänge Limitierungen resultieren und weiter untersucht werden muss, wie sich diese Vereinfachungen bei einem stark nichtlinearen Strukturverhalten auswirken.

Duddeck und Volz (2012) stellen eine leicht abgewandelte Methode mit ESLs vor. Sie bestimmen die ESLs nicht auf mathematischen, sondern physikalischen Grundlagen. Die Lasten werden hierbei in bestimmten Zeitintervallen in bestimmten Bereichen der Struktur aufgebracht, um verschiedene Phasen eines Crashes besser abzubilden. Einen Heckaufprall teilen sie in drei Phasen auf, in denen sich zuerst nur der Stoßfänger deformiert und in den weiteren Phasen kommen z. B. Längsträger und am Ende noch der C-Träger dazu, die erst später deformieren. Jede der Phasen hat eigene ESLs, die sich im Kraftniveau und den Angriffsorten unterscheiden. Anders als bei (Park 2010) verändern sich die Lasten in der Optimierung aber nicht mehr. Durch die Verwendung der einzelnen Phasen wird es möglich, das Wandern der Lasten durch die Struktur zu berücksichtigen. In der Topologieoptimierung mit den linearen statischen FE-Simulationen wird die Minimierung der Nachgiebigkeit als Optimierungsziel verwendet. In einem vorgestellten Beispiel (Volz 2011) konnten die Crasheigenschaften im Vergleich zu einem Design aus der Serienentwicklung verbessert werden. Die Autoren geben an, dass die Methode im Vergleich zur vorher vorgestellten ESLSO und zum folgend noch vorgestellten Hybrid Cellular Automaton (HCA) besser in der Lage scheint, Gesamtfahrzeuge zu optimieren. Andererseits sei die Methode bei der lokalen Topologieoptimierung von einzelnen Komponenten weniger geeignet, da die Energieabsorption durch lokales Beulen nicht mit der Minimierung der Compliance und dem Anstreben gleichmäßiger Energiedichten korrespondiert. Die Ermittlung der Crashphasen und der passenden ESL scheint mit viel Aufwand und Informationsbedarf verbunden, z. B. welche Komponenten bei welchen Kraftniveaus deformieren. Eine einfache Einsetzbarkeit scheint dadurch nicht gegeben. Generell hat die ESL die Schwäche bei großen Deformationen und damit oft einhergehenden Kontakten und Materialversagen, diese nicht ohne Umwege in den Optimierungen mit den linearen statischen Simulationen berücksichtigen zu können. Duddeck und Volz (2012) erwähnen, dass globale Kontakte noch über spezielle ESLs berücksichtigt werden könnten, dies für lokale Kontakte innerhalb eines Bauteils aber noch viel schwieriger werden würde.

Triller et al. (2021) verwenden ESLs in der *difference-based equivalent static load method* (DiESL). Anstatt die ESLs im Vergleich zu Park (2010) basierend auf der undeformierten Struktur am Start der Simulation zu bilden, werden bei DiESL für jeden gewählten Zeitpunkt die ESLs inkrementell basierend auf der Deformation des vorherigen Zeitpunkts so bestimmt, dass ausgehend von dieser die Deformation im aktuellen Zeitpunkt erreicht wird. Als Resultat wird für jeden betrachteten Zeitpunkt ein eigenes FE-Modell verwendet, das eine unterschiedliche Deformation aufweist. In zwei nichtlinearen, dynamischen Beispielen mit Dimensionierungen der Wandstärken, können Triller et al. (2021) mit weniger Funktionsaufrufen ein besseres lokales Optimum finden, als wenn die ESLs in Referenz zu den undeformierten Geometrien gebildet werden.

Patel et al. (2009) verwenden das Prinzip des *Hybrid Cellular Automaton* (HCA) in der Topologieoptimierung, um die Energieaufnahme von crashbelasteten Strukturen zu maximieren

und gleichzeitig die Deformation zu minimieren, ohne eine vorgegebene Masse zu überschreiten oder die Masse zu minimieren, ohne eine erlaubte Deformation zu überschreiten. Um dies zu erreichen, wird in der Struktur mit einem heuristischen Ansatz eine gleichverteilte Energieaufnahme durch plastische Deformation angestrebt. Für ihre Methode werden im Gegensatz zur ESL nur vollständige explizite FE-Simulationen ausgeführt und die Energieabsorptionen ausgewertet. Die relativen Elementdichten werden im Anschluss für jedes Element zwischen 0 (kein Material) und 1 (Vollmaterial) variiert, um unter Berücksichtigung einer Massenrestriktion einen ermittelten Wert für die Energieaufnahme des Elements und der benachbarten Elemente zu erreichen. Ist die Energiedichte unter dem angestrebten Wert, wird die Elementdichte reduziert, ansonsten wird die Elementdichte erhöht. Durch die Betrachtung der Energiedichten in der Nachbarschaft, wird schachbrettartigen Dichtensammlungen (*Checkerboarding*) und der Netzabhängigkeit entgegengewirkt. Die Anpassung der relativen Elementdichte beeinflusst den Elastizitätsmodul, die Streckgrenze und den Verfestigungsmodul des Materials linear, indem die Werte des Vollmaterials mit der relativen Elementdichte multipliziert werden. Elemente mit einer relativen Elementdichte unter einem vorgegebenen Wert werden aus dem Modell entfernt, können später aber wieder in das Modell zurückkehren, wenn die Nachbarn große Energieabsorptionen aufweisen. Als Beispiele verwenden Patel et al. (2009) dreidimensionale Balkenstrukturen, die seitlich durch einen Pfahl getroffen werden. Die Deformation wird in den Beispielen minimiert und als Restriktion muss die gesamte Aufprallenergie absorbiert werden. Als Vorteil der Methode müssen keine statischen Ersatzlastfälle verwendet werden, sondern es kann direkt mit der expliziten dynamischen Simulation gearbeitet werden.

Aulig et al. (2015) verwenden die HCA in einer multidisziplinären Mehrziel-Optimierung, in der gegensätzliche statische und crashrelevante Eigenschaften gleichzeitig optimiert werden. Sie verwenden eine geeignete Skalierung, um die unterschiedlichen Energieniveaus zwischen dem statischen und dynamischen Lastfall ausgleichen zu können. Durch mehrere Optimierungen mit angepassten Gewichtungen zeigen sie, dass sich eine Pareto-Front ausbildet. Diese kann bei der Bauteilauslegung helfen, das Design mit dem besten Kompromiss zwischen der statischen und crashrelevanten Performance auszuwählen. Sie weisen darauf hin, dass durch die heuristische Herangehensweise bei der HCA und die große Anzahl an Designvariablen nicht erwartet werden kann, das globale Optimum zu finden, jedoch andere gut geeignete Designs gefunden werden.

Witowski et al. (2012) fassen nach einigen Tests mit der HCA in einer kommerziellen Software zusammen:

- Die HCA führt zu Topologien, die eine maximale Ausnutzung des Materials hinsichtlich der Aufnahme der Deformationsenergie aufweisen. Dies ist eine Strukturversteifung und entspricht nicht in allen Anwendungen dem gewünschten Ziel.

- In einigen Fällen kommen Trennungen in der Topologie vor, da das Material in der Nähe von Einspannungen, konzentrierten Lasten und Biegebeanspruchungen agglomeriert wird.
- Die Implementierung der Methode ist robust und ihre Anwendung ist mit wenig Aufwand verbunden.

Von Hunkeler et al. (2013), Hunkeler (2014) und Duddeck et al. (2016) werden Erweiterungen der Methode zur HCA for thin-walled structures (HCATWS) vorgestellt, um dünnwandige Strukturen optimieren zu können. Anstatt den Designraum komplett mit Voxel-Elementen zu füllen, verwenden sie eine Art Ground Structure Approach, um den zur Verfügung stehenden Raum mit einem Raster an Wänden zu durchziehen, die mit Shell-Elementen vernetzt sind. Während der Simulation sind diese in der Lage zu Falten und zu Beulen und dadurch Energie zu absorbieren und können außerdem miteinander in Kontakt kommen. Als Designvariable werden die Dicken jeder Wand basierend auf den absorbierten Energien in der Nachbarschaft variiert, um in allen Wänden die gleiche durchschnittliche Energiedichte anzustreben. Dies erfordert jedoch nicht, dass die Energiedichte innerhalb einer Wand gleichmäßig verteilt ist. Wände, die eine zu geringe Dicke aufweisen, werden aus dem Modell entfernt, können aber zurückkehren, wenn in der Nachbarschaft eine große Energieaufnahme vorliegt. Duddeck et al. (2016) führen die Methodik an drei Beispielen von axial gestauchten Profilen vor und vergleichen sie mit Ergebnissen einer Dimensionierung in einem General Purpose Optimierer. Die Vergleiche zeigen zwar, dass die Ergebnisse zwischen der HCATWS und der Dimensionierung sehr ähnlich sind, letztere brauchen aber um Faktor 5-16 mehr Funktionsaufrufe, um die Struktur zu verbessern. Duddeck et al. (2016) erwähnen, dass es sich bei den gefundenen Optima um lokale Optima handelt und so noch weitere Querschnitte mit vergleichbarer oder besserer Performance existieren können. In Hunkeler et al. (2013) finden sich weitere Optimierungen zu Schwellern in einem Pfahlaufprall.

Zeng und Duddeck (2017) beschreiben weitere Verbesserungen an der HCATWS, die gleichzeitig die Minimierung der Masse und die Homogenisierung der Energiedichten vorantreiben und im Vergleich zu Duddeck et al. (2016) die Chance aufweisen noch leichtere Strukturen zu finden und dies teils mit weniger Funktionsaufrufen zu schaffen.

Dadurch, dass die HCATWS keine neuen Strukturen erzeugt, sondern Bereiche des Bauteils entfernt und zurückkommen lässt, ist die Methode abhängig von der Wahl des Startentwurfs. Die Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung (GHT) (Olschinka und Schumacher 2008; Ortmann und Schumacher 2013; Ortmann 2015; Ortmann et al. 2021) verfolgt im Vergleich zu den bisher vorgestellten Methoden einen sehr abweichenden Ansatz. Die Hauptanwendung war zu Beginn die Optimierung der Querschnitte von crashbelasteten Strangpressprofilen. Die Methode wurde seitdem aber nach und nach auf andere Crash-Anwendungsfelder erweitert. Die Geometrien werden durch einen mathematischen *Graphen* beschrieben, der einerseits leicht manipuliert werden kann und andererseits genutzt wird, um die Einhaltung von Fertigungsrestriktionen mit dafür definierten Methoden zu prüfen. Durch

implementierte Schnittstellen kann der *Graph* in ein rechenfähiges FE-Modell überführt werden, in dem das Profil mit Schalenelementen vernetzt ist. Die Schalenelemente ermöglichen Phänomene wie Faltenbeulen in der Simulation abzubilden. Während der Optimierung werden in einer äußeren Schleife Heuristiken aufgerufen, die z. B. Anpassungen der Topologie vorschlagen, um das strukturmechanische Verhalten zu verbessern. Die Heuristiken basieren auf Expertenwissen und analysieren die Daten einer Crashesimulation, um z. B. Deformationsräume in der Struktur zu erkennen, in denen sich Strukturen aufeinander zubewegen. Durch das gezielte Einbringen einer Wand in diesen Deformationsraum, kann während der Kompression effektiv Energie absorbiert und die Struktur stabilisiert werden. Durch die vielfältigen Möglichkeiten der Heuristiken, Wände einzuziehen oder zu entfernen, hängt die Methode nur wenig vom dem initial gewählten Startentwurf ab. Die Heuristiken werden konkurrierend aktiviert, sodass in jeder Iteration ca. 15-30 Designs generiert und bewertet werden, die miteinander im Wettbewerb stehen. Durch dieses Vorgehen werden schlechte lokale Optima leichter übersprungen.

Die Bewertung der Struktur kann in einer inneren Optimierungsschleife durch eine einzelne Crashesimulation erfolgen oder durch mehrere FE-Simulationen in einer kleinen Dimensionierung z. B. der Wandstärken. Die Dimensionierung bietet den neuen Designs die Chance, die durch das Einziehen einer neuen Wand sprunghaft geänderte Steifigkeit, Masse und weitere Strukturantworten durch die Anpassung der Wandstärken wieder auf das aktuelle Optimierungsproblem einzustellen. Die innere Optimierungsschleife wird standardmäßig durch die Software LS-OPT ausgeführt, in der jede Strukturantwort als Optimierungsziel oder Restriktion verwendet werden kann, die aus den Simulationsdaten extrahierbar ist. Nach den Bewertungen der Entwürfe wird eine vorgegebene Anzahl der besten Designs in die nächste Iteration der äußeren Schleife übergeben, in der für jedes Design wieder alle Heuristiken einzeln aktiviert werden. Der Prozess geht weiter, bis keine Verbesserung mehr durch die Heuristiken erreicht werden kann. Im Anschluss kann optional noch eine Formoptimierung und Dimensionierung für das beste gefundene Design ausgeführt werden, um noch weitere Verbesserungen für das Optimierungsziel zu erreichen. Durch die Bewertung aller in der Optimierung ermittelten Designs mit Crashesimulationen hat die Methode einen großen Ressourcenaufwand, kann durch die Vielzahl der mit Expertenwissen erstellten Designs aber auch in komplexen Optimierungsproblemen deutliche Verbesserungen erzielen. Da es sich bei den Simulationen um vollständige Crashesimulationen handelt, können z. B. Kontakte und Materialversagen definiert werden. Durch die Verwendung von *Graphen* und geeigneten Schnittstellen sind neben Strangpressprofilen auch weitere Anwendungen realisierbar wie die Optimierung von Rippen (Schneider und Schumacher 2018), Flanschstrukturen (Schneider et al. 2018; Link et al. 2019), axial belasteten Profilen mit Triggern (Sperber et al. 2019) und 3D-Rahmenstrukturen (Beyer et al. 2021).

2.3 Einsatz von Faserverbunden in Crashstrukturen

FKV bestehen aus zwei Komponenten und versuchen durch deren Kombination einen Werkstoff zu erhalten, der die Vorzüge beider Materialien verbindet. Sie bestehen einerseits aus steifen Fasern (z. B. Carbon, Glas, Aramid) mit einer hohen spezifischen Festigkeit und Steifigkeit und andererseits aus einer Matrix, die diese Fasern zusammenhält (Peters 1998). Die Fasern können als Partikel, Kurzfasern, Langfasern oder Endlosfasern in den Verbund eingebracht werden. Die Matrix ist in der Regel deutlich schwächer als das Fasermaterial und besteht in den meisten Anwendungen aus duroplastischen oder thermoplastischen Kunststoffen. Für Spezialanwendungen wie den Einsatz unter hohen Temperaturen oder besonderen Verschleißanforderungen existieren auch keramische und metallische Faser-Matrix-Systeme (Hallal et al. 2014). Peters (1998) listet folgende Vor- und Nachteile der FKV auf:

- + Gewichtsreduktion durch hohe spezifische Festigkeit oder Steifigkeit
- + Lastpfadspezifische Materialorientierungen möglich
- + Hohe Langlebigkeit (keine Korrosion)
- + Geringere Herstellkosten durch geringere Anzahl an Bauteilen
- + Erhöhte oder reduzierte thermische oder elektrische Leitfähigkeit
- Höhere Material- und Verarbeitungskosten
- Möglicherweise schlechte Materialeigenschaften in Matrixrichtung
- Recycling und Entsorgung aufwendig
- Anbindungstechnik kompliziert
- Aufwendige Auslegung
- Degradation je nach Matrix unter Umwelteinflüssen

Das Verbundmaterial wird in Form von Halbzeugen als uni- und multidirektionale Gelege, Gewebe, Gestricke, Geflechte, Matten und Tapes verarbeitet oder direkt in den Herstellprozess integriert, wie z. B. durch die Zugabe von Kurz- und Langfasern in einen Spritzgussprozess. Bei dem Einsatz von einem FKV ist stets auch die Anbindungstechnik zu beachten und Spannungskonzentrationen sind zu vermeiden. Lokale mechanische Verbindungen wie Bolzen und Niete benötigen Bohrungen, die bei einer Durchtrennung der Fasern zu einer Schwächung des Bauteils führen können. Darum werden alternative mechanische Verbindungen, Klebungen und Schweißungen eingesetzt (Hallal et al. 2014).

In der Automobilindustrie gewinnen FKV mit einer thermoplastischen Matrix zunehmend an Bedeutung, da sie eine höhere Belastbarkeit, kürzere Prozesszeiten und eine bessere Recyclingfähigkeit aufweisen als die FKV mit einer duroplastischen Matrix (Friedrich 2016).

Friedrich (2016) stellt einige konkrete Einsatzbeispiele von FKV im Automobilbereich wie Armaturenbretter, Fahrgastzellen von Sportfahrzeugen, Türschweller, Crashabsorber und Sitze für den Rennsport vor. Auch existieren Untersuchungen zum Einsatz von Stoßstangen aus FKV im Frontalcrash mit niedriger Geschwindigkeit (Marzbanrad et al. 2009). Bei der

richtigen Auslegung und Belastungssituation kann ein FKV den Metallen in einer Crashanwendung überlegen sein und mehr Energie absorbieren bzw. mit weniger Gewicht die gleiche Energie absorbieren. Darum finden FKV als Energieabsorber im Motorsport, aber auch in der Serienproduktion von Fahrzeugen, Einsatz (Belingardi et al. 2013a). Die Strukturantworten und das Versagensverhalten hängen in einer Crashanwendung neben den Faser- und Matrixeigenschaften und dem damit realisierten Lagenaufbau auch von der Form, den Dimensionen, den Geschwindigkeiten und Energien, dem Auftreffwinkel sowie der Geometrie des Impaktors ab (Seangatith 2008). Wo metallische Crashstrukturen die Energie durch plastische Deformation zumeist in Form von Faltenbeulen absorbieren, nehmen die FKV-Strukturen bei axialen Belastungen die Energie durch progressives Versagen (Crushing) mit feinen Brüchen und Rissen in Form eines Verpulverns oder eines Aufspreizens der Struktur auf (Belingardi et al. 2013a; Lukaszewicz 2014). Dabei trägt Reibung und Delamination zur Energieabsorption bei. Durch das Verpulvern kann nahezu die ganze Strukturlänge für die Energieabsorption genutzt werden, während metallische Strukturen einen Teil des Deformationsweges dadurch verlieren, dass die entstehenden Falten irgendwann alle aufeinander liegen und die Struktur somit „auf Block geht“ und sich nicht weiter verformen kann. Andere Faseranordnungen, geänderte Faservolumenanteile und abweichende Verbundmaterialien können auch zu anderen Versagensmodi führen, in denen sich die Struktur aufspreizt (Hull 1991; Hamada et al. 1992). In jedem Fall muss durch geeignete Maßnahmen ein globales Wegbrechen oder Ausbeulen vermieden werden. Reynolds et al. (2014) zeigen, dass ein FKV-Rohr im Dreipunktebiegeversuch und bei axialer Stauchung mehr Energie aufnehmen kann als Rohre aus Stahl und Aluminium.

Bei lateral belasteten Strukturen erfolgt die Energieaufnahme durch andere Mechanismen. Dabei sind laterale Belastungssituationen von FKV-Strukturen noch deutlich weniger untersucht als Beanspruchungen in Richtung der Profilachse. Versuche von Charoenphan et al. (2004) zeigen bei einer lateralen Belastung eines pultrudierten Profils ein Reißen entlang von Strukturkanten. Janapala et al. (2008) testen triaxial geflochtene Profile in einer Art 4-Punkt-Biegeversuch und simulieren diesen analog bei verschiedenen Geschwindigkeiten. In den Versuchen setzt zuerst Matrixversagen in den Bereichen des Lastangriffs ein und wächst von dort in innere Schichten und zu den Seiten des Profils. Erst später versagen die Fasern in Druckrichtung, wodurch das Rohr seine strukturelle Integrität verliert und kollabiert. Ein Verpulvern, das oft bei axial belasteten Rohren auftritt, liegt folglich nicht vor. Abdewi et al. (2008) testen verschiedene runde gewebte Glasfaserrohre mit einer Epoxidmatrix in quasistatischen axialen und lateralen Druckversuchen. Während bei der axialen Kompression ein Crushing mit radialem Aufspreizen stattfindet, versagen die Proben bei der lateralen Kompression durch mehrere Brüche parallel zur Profilachse. Die Proben haben bei der lateralen Belastung mit 0,287-0,374 kJ/kg eine deutlich geringere spezifische Energieabsorption als bei der axialen Belastung mit 3,41-12,1 kJ/kg. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass mit

einer anderen Querschnittsgeometrie mit zur Lastrichtung parallelen Wänden vermutlich etwas bessere Energieabsorptionswerte während der lateralen Kompression erreicht werden könnten, da die in der Untersuchung eingesetzten runden Wände sofort eine Biegedeformationen erfahren.

Hergestellt werden Profilstrukturen aus FKV hauptsächlich durch Profilizhverfahren (zumeist als Pultrusion bezeichnet) und Wickeln, die von Witten (2013) beide wie folgt beschrieben werden. Bei der Pultrusion handelt es sich um ein kontinuierliches Verfahren, bei dem Kombinationen aus Rovings, Matten, Geweben und Vliese durch ein formgebendes Werkzeug gezogen werden. Vor oder während dem Prozess wird das Material in Harz getränkt und im Anschluss innerhalb des Werkzeugs komprimiert und erwärmt, sodass die Vernetzung des Harzsystems einsetzt und sich eine feste Matrix bildet. Es wird angegeben, dass in dem Prozess für eine duroplastische Matrix Abzugsgeschwindigkeiten von 0,02-3 m/min realisierbar sind und für eine thermoplastische Matrix bis zu 20 m/min. Nach dem Prozess können die Profile auf die gewünschte Länge gesägt werden. Durch den Prozess sind Profile mit Hinterschnitten, unterschiedlichen Wanddicken und Hohlkammern möglich, sie brauchen jedoch immer einen ausreichenden Anteil an axial verlaufenden Fasern, um die Abzugskräfte aus dem Werkzeug auszuhalten, die durch die Reibung zwischen dem Halbzeug und den Werkzeuggewänden entstehen.

Die Wickelverfahren werden nach Witten (2013) zur Herstellung von zumeist rotationssymmetrischen Behältern, Rohren, Masten, Silos, Tanks und sogar Raketenantrieben eingesetzt. Die Geometrie wird hierbei durch den Wickelkern vorgegeben, auf den das Material gewickelt wird. Das Wickeln erfolgt zumeist diskontinuierlich, da nach jedem Bauteil der Kern ausgetauscht werden muss. Es gibt jedoch auch für Anwendungen wie Standardrohre kontinuierliche Verfahren, in denen der Kern translatorisch und rotatorisch bewegt wird und gleichzeitig eine Vielzahl von Rovings darauf abgelegt werden.

Bei dem Wickeln mit einem Duroplast werden die Rovings vor dem Ablegen durch ein Imprägnierbad gezogen, um mit dem Harz benetzt zu werden. Das Harzsystem muss darum eine niedrige Viskosität aufweisen und muss während des gesamten Wickelzyklus eine ausreichende Viskosität beibehalten. Nach dem Prozess muss das Bauteil ggf. in einem Ofen aushärten, damit sich die Matrix vollständig vernetzt.

Beim Wickeln mit thermoplastischen Materialien können Tapes und Rovings verwendet werden, deren Matrix beim Ablegen lokal durch die Zufuhr von Wärme aufgeschmolzen wird. Wenn gleichzeitig auch der Ablagepunkt auf der Wickelstruktur aufgeschmolzen wird, kann die neue Lage mit der Struktur verschweißt werden. Als Wärmequelle kann ein Laser, Infrarotstrahler, Heißgas oder eine offene Flamme eingesetzt werden, wobei der Laser am genauesten ansteuerbar ist, die offene Flamme aber die größten Wickelgeschwindigkeiten von bis zu 60 m/min ermöglicht (Witten 2013).

Aus der Geometrie des Wickelkerns und der Kinematik in der Wickelanlage können Restriktionen für die Faserorientierung entstehen. So können Fasern in Richtung der Profillachse unter Umständen nur abgelegt und nicht gewickelt werden.

Die **Abbildung 1-1** mit einem bei der Firma AFPT gewickelten quadratischen Profil zeigt, dass in dem Wickelprozess mit Tapes (Kölzer 2008) nicht ausschließlich rotationssymmetrische Strukturen hergestellt werden können, sondern auch vieleckige Querschnitte mit verrundeten Kanten und ohne Hinterschnitte. Das Wickelverfahren ist im Vergleich zum Pultrusionsverfahren bei Kleinststückzahlen günstiger, da lediglich ein Kern gefertigt werden muss und keine teuren Werkzeuge.

Durch die verschiedenen Versagensmodi bei unterschiedlichen Lastfällen und die vielen Freiheitsgrade, ist die Auslegung, Vorhersage und Herstellung von crashbelasteten FKV-Strukturen sehr anspruchsvoll und setzt eine intensive Materialcharakterisierung unter Berücksichtigung der Anisotropie voraus. Außerdem ist bei der Optimierung von FKV-Strukturen immer auch das angestrebte Herstellverfahren zu berücksichtigen, da dies nicht nur die Kosten und den erzielbaren Durchsatz bestimmt (Belingardi et al. 2013b), sondern auch zu zusätzlichen Restriktionen für den Lagenaufbau und die Geometrie führt.

Bei der Auslegung von FKV Strukturen können verschiedene Verfahren helfen. So gibt es als kleinen Auszug neben den in Abschnitt 2.1 vorgestellten Optimierungsverfahren speziell für FKV in statischen Anwendungen noch weitere Methoden, die den Lagenaufbau optimieren, indem sie die Reihenfolge und Anzahl der Lagen mit verschiedenen Orientierungen verändern. Durch die Verwendung eines genetischen Algorithmus können mit mehreren Hundert oder Tausend Funktionsaufrufen Verbesserungen in statischen Anwendungsfällen erreicht werden (Park et al. 2008).

Andere Methoden erlauben die Optimierung der Orientierungen von einzelnen unidirektionalen Lagen oder die Ausrichtung der Fasern innerhalb einer oder mehrerer Lagen für statische Anwendungsfälle (Peeters et al. 2015; Petrovic et al. 2018). Ferreira et al. (2014) nutzen hier einen Ansatz zur diskreten Materialoptimierung. Hierbei wird ein Material aus den Kennwerten verschieden orientierter Materialien aufgebaut. Die Auswahl des Materials erfolgt über eine Variable und eine Gewichtung für jedes Material, die von dieser Variablen abhängt. Die Formeln für die Gewichtungen werden so angepasst, dass in Abhängigkeit von der Variablen immer nur eine Gewichtung gegen 1 strebt und der Rest gegen 0, sodass die Kennwerte eines Materials verwendet werden. Durch die Verwendung eines Penaltyexponenten bei der Berechnung der Gewichtungen, werden Mischmaterialkennwerte in der Optimierung bestraft. Neben der Orientierung werden auch der Faservolumenanteil und die Faserform optimiert. Als Ziel wird in verschiedenen Beispielen die Nachgiebigkeit minimiert. Stegmann und Lund (2005) verwenden die Diskrete Material Optimierung um einerseits die Orientierung der Fasern zu bestimmen, sie optimieren jedoch auch gleichzeitig die Topologie, um festzulegen wo Material eingesetzt werden soll und wo nicht.

Für den Einsatz in Crash-Anwendungen sind die Verfahren nicht geeignet. Sie brauchen entweder zu viele Funktionsaufrufe oder analytische Sensitivitäten, die für crashrelevante Strukturantworten nicht vorliegen. Es existieren jedoch Untersuchungen, in denen einige geometrische Parameter optimiert werden.

Duan et al. (2014) führen eine metamodellbasierte Optimierung durch, in der der Radius und die Dicke eines axial belasteten Wellenprofils optimiert wird, um die spezifische Energieabsorption zu maximieren und die entstehenden Kraftpeaks zu minimieren. Ciampaglia et al. (2021) verfolgen mit einer metamodellbasierten Optimierung die gleichen Ziele. Hier wird jedoch eine oktaedrische Origamicrashbox optimiert, deren Form über zwei Längenvariablen anpassbar ist. Zarei et al. (2008) nutzen ein Metamodell in Kombination mit einem genetischen Algorithmus, um ein axial belastetes FKV-Rohr mit thermoplastischer Matrix zu optimieren. Hierbei wird eine Maximierung der spezifischen Energieabsorption angestrebt, während die mittlere wirkende Kraft restringiert wird. Durch eine Anpassung der Dicke, Länge und Breite des Profils kann die Crashbox mit 26 % weniger Masse, 17 % mehr Energie als ein Aluminiumrohr absorbieren. Zhang et al. (2018) nutzen eine ähnliche Methode, um die Orientierungen von gewickelten Glasfaserrohren mit thermoplastischer Matrix so anzupassen, dass die spezifische Energieabsorption maximiert wird.

Liu et al. (2016) schauen sich im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Untersuchungen einen lateral belasteten FKV-Stoßfänger an. Es werden insgesamt fünf Dickenvariablen und vier Formvariablen in einem CAD-Modell variiert und darauf basierend automatisch die FE-Modelle abgeleitet. Es wird mit einem Partikelschwarmalgorithmus (Kennedy und Eberhart 1995) gearbeitet, der die Optimierung auf Metamodellen durchführt, die mit den Daten von statischen und dynamischen Simulationen bestückt sind. Als Ziel wird die Masse unter der Berücksichtigung verschiedener Restriktionen für die einzelnen Lastfälle minimiert. Das um 31,5 % leichtere Stoßfängersystem wurde im Anschluss gefertigt und getestet. Zhu et al. (2017) optimieren ebenfalls metamodellbasiert einen FKV-Stoßfänger mit nichtlinearen dynamischen Simulationen, indem die Anzahl der Lagen in zwei Abschnitten des Stoßfängers sowie die Anteile der beiden Abschnitte optimiert werden. Die Masse und maximal auftretende Kräfte werden minimiert, während zulässige Verformungen nicht überschritten werden dürfen. Durch die Aufteilung in zwei Abschnitte mit abweichenden Lagenanzahlen kann eine Massenreduktion von 7,5 % im Vergleich zu einem einheitlichen Lagenaufbau erreicht werden. Stoßfänger aus FKV wurden auch in weiteren Untersuchungen analysiert (Hosseinzadeh et al. 2004; Davoodi et al. 2010; Davoodi et al. 2011), jedoch ohne den Einsatz von Optimierungen.

Die vorgestellten Methoden haben gemeinsam, dass sie nur wenige geometrische Parameter optimieren und nur für wenige Designvariablen funktionieren. Die gleichzeitige Betrachtung von Form- und Dickenvariablen sowie Materialparametern für den Lagenaufbau, der Faserart und des Faservolumenanteils würde zu sehr komplexen Optimierungsproblemen mit einem nicht leistbaren Ressourcenbedarf führen (Liu et al. 2016).

3 Geometriebeschreibung mit Graphen

3.1 Gründe für die Arbeit mit mathematischen Graphen

Die mathematischen *Graphen* bilden in der GHT die Grundlage zur Beschreibung und Anpassung der Geometrie (Ortmann 2015; Ortmann und Schumacher 2013). Ortmann (2015) nennt folgende Vorteile für die Verwendung der *Graphen*:

- Anpassungen der Form und Topologie können an dem *Graphen* mit wenig Aufwand vorgenommen werden.
- Die FE-Modelle können nach jeder Anpassung des *Graphen* neu generiert werden, sodass keine parametrisierten FE-Modelle verwendet werden müssen und somit keine verzerrten Elemente entstehen.

Weitere zu nennende Vorteile für die Verwendung der *Graphen* in der GHT lauten:

- Durch die Assoziierung der FE-Knoten und FE-Elemente mit den Graphenelementen und somit den einzelnen Bestandteilen des *Graphen*, kann das Deformationsverhalten und die Beanspruchung der einzelnen strukturellen Komponenten mit Heuristiken analysiert werden.
- Es können vielfältige algorithmische Fertigungsrestriktionen definiert werden, die die Herstellbarkeit durch Prüfung von z. B. Abständen, Längen und Winkeln zwischen den Komponenten des *Graphen* gewährleisten.
- Der *Graph* kann über Schnittstellen direkt in Geometriemodelle überführt werden. Dadurch ist es nach einer Optimierung nicht nötig, die Geometrien aus dem FE-Netz abzuleiten und aufwendig zu interpretieren, wie es z. B. bei voxelbasierten Topologieoptimierungen nötig ist.

3.2 Syntax der Graphen

Die einzelnen Graphenelemente entsprechen Objekten, die Strukturinformationen speichern und verarbeiten und verschiedene Methoden bereitstellen, um diese Kennwerte abzufragen. Alle Graphenelemente speichern allgemeine Attribute wie die Identifikationsnummer (ID), den Typ, den Namen und weitere Parametersets mit zusätzlichen Informationen. Die Graphenelemente haben Beziehungen zueinander und können andere Graphenelemente referenzieren, wenn diese für die eigene Definition notwendig sind. Die Zusammenhänge zwischen den eingesetzten Graphenelementen sind in **Abbildung 3-1** dargestellt. Der Name von jedem einzelnen Graphenelement ist eine eindeutige Kennung, die sich aus einer Abkürzung für die Art des Graphenelements und der ID auseinandersetzt, sowie möglichen Zuordnungen zu weiteren Graphenelementen. Die Namen werden später in den FE-Modellen für die Kompo-

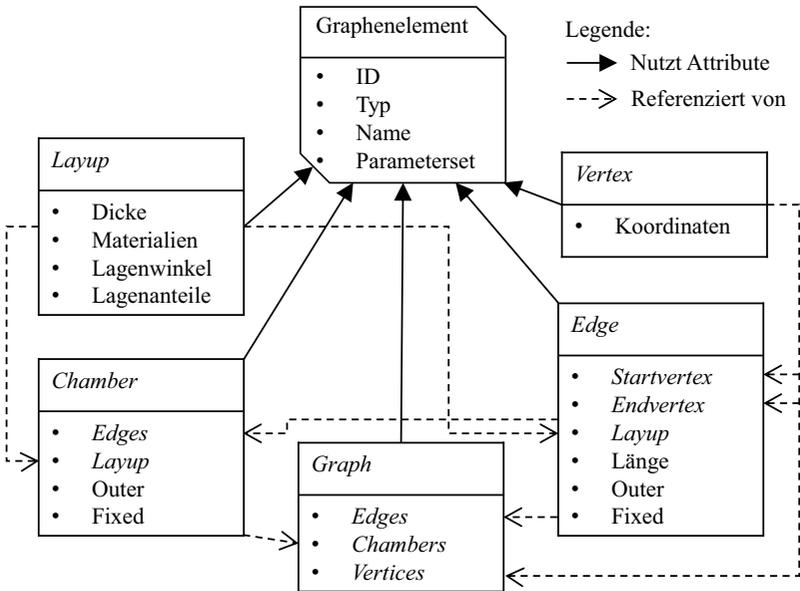


Abbildung 3-1: Diagramm der Graphenelemente und ihrer wichtigsten Attribute mit den Beziehungen zueinander

mentennamen verwendet, um die Simulationsdaten eindeutig den Graphenelementen zuzuordnen zu können. Der Typ erlaubt es den Graphenelementen verschiedene Bedeutungen anzunehmen. Es wird im Weiteren mit englischen Bezeichnungen für die Graphenelemente gearbeitet, um bei der Verwendung in dieser Arbeit eindeutig diese Graphenelemente anzusprechen.

Der *Graph* kann über eine Typunterscheidung eine 3D-Rahmenstruktur beschreiben oder einen 2D-Querschnitt eines Profils (Beyer et al. 2021). Um die Geometrie einer Struktur zu beschreiben, ist immer ein *3D-Graph* erforderlich, der die Anzahl und jeweilige Anordnung der Profile in der Gesamtstruktur beschreibt. Für jedes Profil wird wiederum ein *2D-Graph* definiert, der den Querschnitt des Profils beschreibt. Für die Anwendungen in dieser Arbeit, bei der einzelne FKV-Profile optimiert werden, wird in dem *3D-Graphen* immer nur ein einzelnes Profil definiert und ausgerichtet. Somit gibt es auch nur einen *2D-Graphen*, der den Querschnitt dieses Profils beschreibt. Der *Graph* enthält Listen mit *Vertices*, *Edges* und *Chambers*, die die Geometrien des Rahmens bzw. der Querschnitte beschreiben. Die Visualisierung eines exemplarischen *2D-Graphen* mit den angesprochenen Graphenelementen ist in **Abbildung 3-2** dargestellt.

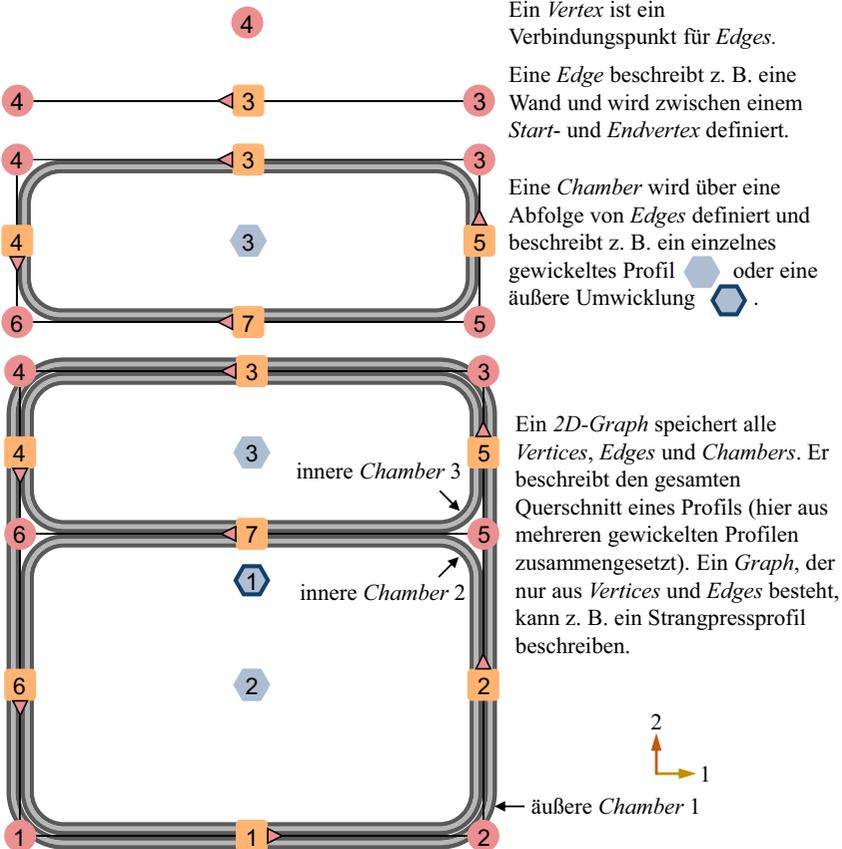


Abbildung 3-2: Visualisierung der Graphenelemente und deren Zusammensetzung zu einem 2D-Graphen

Ein *Vertex* speichert 2D- oder 3D-Koordinaten, um Verbindungspunkte (*Type (Link)*) in einem 2D-Querschnitt in einem lokalen Koordinatensystem zu definieren oder die Lage von Profilen im 3D-Raum mit globalen Koordinaten festzulegen. Bei der Anordnung der Profile im 3D-Raum werden somit Koordinaten in der globalen X-, Y- und Z-Richtung verwendet. In Abgrenzung dazu werden die Koordinaten des 2D-Querschnitts in der 1- und 2-Richtung angegeben, welche die lokale X- und Y-Achse darstellen. Die 3-Achse entspricht in dem lokalen Koordinatensystem der Extrusionsrichtung und wird bei der Definition des Querschnitts nicht benötigt. Die *Vertices* werden von den *Edges* als Start- und Endpunkt verwendet. Im *3D-Graph* repräsentiert eine *Edge* ein Profil (*Type (ExtrudedProfile)*), das zwischen

dem Start- und End-*Vertex* eingezeichnet wird. Sie enthält einen Verweis zu einem 2D-*Graph*, der den Querschnitt des Profils definiert. Im 2D-*Graph* repräsentiert die *Edge* eine Wand der Struktur (Type (ExtrudedWall)). In beiden Fällen kann über zwei zusätzliche Längenparameter angegeben werden, ob die Strukturen direkt an den *Vertices* beginnen oder in einen Abstand dazu starten. Die *Edges* speichern mit zwei booleschen Variablen die Information, ob sie außen liegen (*Outer*) und ob sie für Änderungen und eine mögliche Löschung gesperrt werden (*Fixed*). Erstere Information kann dazu verwendet werden, besondere Eigenschaften wie Kontaktwanddicken für äußere *Edges* zu definieren und letztere legt fest, ob die *Edge* während der Optimierung erhalten bleiben muss und ob ihre Position in der Formoptimierung verändert werden darf. Falls die beiden Werte nicht angegeben sind werden sie standardmäßig mit *false* besetzt.

Das nächste Graphenelement ist die *Chamber*, die nur im 2D-*Graphen* vorkommt. Sie beschreibt eine geschlossene Kammer, um unter anderem ein Wickelprofil repräsentieren zu können (Type (ExtrudedChamber)). Die Geometrie der *Chamber* wird über eine Abfolge von *Edges* definiert. Die Umlaufrichtung der *Chamber* verläuft immer entgegen des Uhrzeigersinns. Falls eine *Chamber* mit einem gegenläufigen Verlauf angegeben wird, wird der Umlaufsinn bei Einladen des *Graphen* umgekehrt. Auch die *Chamber* weist die Information auf, ob sie außen liegt und fixiert ist. Eine äußere *Chamber* umschließt dabei die enthaltenen inneren *Chambers*, z. B. als zusätzliche Tapeumwicklungen.

Sowohl die *Chambers* als auch die *Edges* besitzen als weiteres Element ein *Layup*, das die Wandstärke und das zugewiesene Material speichert. Letzteres wird als ID angegeben, die der verwendeten Material-ID im FE-Modell entsprechen muss. Wenn eine FKV-Struktur beschrieben wird, muss für jede Lage ein Winkel, der Anteil der Dicke von der Gesamtdicke der *Edge* oder *Chamber* und das Material angegeben werden. Mehrere Lagen können hierbei zu Lagengruppen durch eckige Klammern zusammengefasst werden, um zu signalisieren, dass die enthaltenen Lagen in dem FE-Modell durch eine Schicht an Schalenelementen repräsentiert werden sollen. Auf die Vorteile und Nachteile des Vorgehens wird bei der Generierung der FE-Modelle eingegangen. *Edges* können eine Dicke von 0 mm aufweisen, wenn sie lediglich für die Definition der *Chambers* genutzt werden. Falls sie eine Dicke aufweisen und zusätzlich an zwei *Chambers* grenzen, kann die *Edge* als Verstärkungsschicht zwischen diesen beiden *Chambers* interpretiert werden und somit z. B. als lokal abgelegte Tapes auf der angrenzenden Wand der *Chamber*. Weist ein 2D-*Graph* keine *Chambers* auf, entsprechen die *Edges* den Wänden in einem Extrusionsprofilquerschnitt und haben dann eine Dicke größer 0 mm.

Folgend ist die Syntax für den in **Abbildung 3-2** vorgestellten 2D-*Graphen* mit zwei inneren und einer äußeren *Chamber* angegeben:

```
Graph; 1; Type(2DExtrusion)
Vertex; 1; Type(Link); Coordinates(-50,-50)
Vertex; 2; Type(Link); Coordinates(50,-50)
```

```

Vertex; 3; Type(Link); Coordinates(50,50)
Vertex; 4; Type(Link); Coordinates(-50,50)
Vertex; 5; Type(Link); Coordinates(50,15)
Vertex; 6; Type(Link); Coordinates(-50,15)
Chamber; 1; Edges(1,2,5,3,4,6); Thickness(3.0); Outer(true);*
Chamber; 3; Edges(5,3,4,7); Thickness(3.0); Outer(false);*
Chamber; 2; Edges(1,2,7,6); Thickness(3.0); Outer(false);*
Edge; 1; Vertices(1,2); Type(ExtrudedWall); Thickness(0.0)
Edge; 3; Vertices(3,4); Type(ExtrudedWall); Thickness(0.0)
Edge; 2; Vertices(2,5); Type(ExtrudedWall); Thickness(0.0)
Edge; 5; Vertices(5,3); Type(ExtrudedWall); Thickness(0.0)
Edge; 4; Vertices(4,6); Type(ExtrudedWall); Thickness(0.0)
Edge; 6; Vertices(6,1); Type(ExtrudedWall); Thickness(0.0)
Edge; 7; Vertices(5,6); Type(ExtrudedWall); Thickness(0.0)
                                     *Type(ExtrudedChamber)

```

Jede Zeile definiert ein Graphenelement und beginnt mit der Kennzeichnung des Elements, gefolgt von der ID. Danach schließen sich, durch Semikolons getrennt, die Attribute der Elemente an, wobei jeweils der Name des Attributs genannt wird und in runden Klammern dahinter die zugehörigen Werte folgen. Falls ein Attribut mehrere Werte enthält, werden diese durch ein Komma getrennt. Da die Syntax das amerikanische Zahlenformat verwendet, wird der Punkt als Dezimaltrennzeichen genutzt. Die Attribute können in beliebiger Reihenfolge angegeben werden. Für die *Edges* und *Chambers* kann jeweils noch die Informationen angegeben werden, ob diese sich innen oder außen befinden (`Outer(false/true)`) und ob sie gelöscht und in ihrer Form variiert werden dürfen oder nicht (`Fix(false/true)`).

In **Abbildung 3-2** visualisieren die Kreise die definierten *Vertices*. Die Quadrate repräsentieren die *Edges* zwischen den *Vertices*, die in diesem Beispiel nur genutzt werden, um die *Chambers* zu definieren. Die kleinen Pfeile an den Quadraten geben hierbei die Richtung der *Edges* an. Die Sechsecke gehören zu den *Chambers* und sind in ihrem Zentrum positioniert. Das Symbol von *Chamber 1* ist als äußere *Chamber* farblich hervorgehoben. Die *Chambers* sind an den Verbindungsstellen der *Edges* mit einem in der Konfigurationsdatei angegebenen inneren Radius verrundet. Die inneren *Chambers* werden innerhalb des *Edge*-Pfades erzeugt und berücksichtigen weitere mögliche Abstände, falls die *Edges* eine Dicke aufweisen und eine Verstärkungsschicht darstellen oder wenn in der Konfigurationsdatei Klebespalte definiert sind. Die äußere *Chamber* umwickelt die inneren *Chambers* und kann somit verschiedene Verrundungsradien besitzen, je nach den äußeren Radien der angrenzenden inneren *Chambers*. Pro 2D-*Graph* kann nur eine äußere *Chamber* definiert werden, da nur eine Umwicklung um alle inneren *Chambers* möglich ist.

In der angegebenen Syntax fehlt noch die Beschreibung des Lagenaufbaus, die sich an die jeweiligen Zeilen der *Edges* und *Chambers* anschließen kann. Folgend ist die Syntax eines Lagenaufbaus mit zehn Lagen angegeben, die zu drei Lagengruppen gruppiert werden:

```

Layerfractions ([0.1:0.1:0.1:0.1], [0.1:0.1], [0.1:0.1:0.1:0.1])
Layerangles ([87:-87:87:-87], [10:-10], [45:-45:45:-45])
Material ([1:1:1:1], [1:1], [1:1:1:1])

```

Die Lagengruppen werden durch eckige Klammern umschlossen und innerhalb der Lagengruppe werden die Werte mit Doppelpunkten voneinander getrennt. Die Lagen weisen in dem angegebenen Beispiel jeweils einen Anteil (`Layerfraction`) von 0,1 der Gesamtdicke des Lagenaufbaus auf. Falls die Summe der Lagenanteile nicht 1 ergibt, werden die Anteile dementsprechend skaliert, sodass das Verhältnis auch mit Ganzzahlen angegeben werden kann. Die erste Lagengruppe hat die Orientierung (`Layerangle`) $\pm 87^\circ_2$, die zweite Lagengruppe $\pm 10^\circ$ und die letzte Lagengruppe $\pm 45^\circ_2$. Ein Winkel von 0° würde hierbei einer Ausrichtung parallel zur Profilachse und 90° der Umlaufrichtung der *Chamber* entsprechen. Der Lagenaufbau für die *Chambers* ist immer von innen nach außen angegeben, sodass er bei Tapewickelpprofilen der Reihenfolge der aufgebracht Wicklungen entspricht. In dem angegebenen Beispielen ist allen Lagen das Material mit der ID 1 zugeordnet, das in dem zugehörigen FE-Modell bereits existieren muss. Falls allen Lagen das gleiche Material zugeordnet werden soll, kann die ID vereinfacht nur einmal angegeben werden und wird dann für alle Lagen übernommen (z. B. `Material(1)`). Falls symmetrische Lagenaufbauten verwendet werden, kann das bei den Attributen durch den zusätzlichen Buchstaben `s` gekennzeichnet werden. `Layerangles(0, 90, s)` impliziert z. B. einen symmetrischen $[0^\circ; 90^\circ; 90^\circ; 0^\circ]$ -Lagenaufbau und sorgt außerdem dafür, dass der Lagenaufbau während der Optimierung symmetrisch bleibt.

Die Lage und Länge des Profils wird über einen 3D-*Graphen* beschrieben (Beyer et al. 2021). Die folgende Syntax definiert ein 300 mm langes Profil parallel zur X-Achse von den Koordinaten (-150/ 0/ 50) zu den Koordinaten (150/ 0/ 50):

```

Graph; 1; TYPE(3DGrid); Name(FKVProfil); Source(OrdnerA)
Vertex; 1; Type(Link); Coordinates(-150,0.0,50)
Vertex; 2; Type(Link); Coordinates(150,0.0,50)
Edge; 1; Vertices(1,2); Type(ExtrudedProfile,SectionA);
      Orientationvector(0,0,1)

```

Der *Graph* besteht lediglich aus einer *Edge*, die das Profil repräsentiert und zwei *Vertices* mit 3D-Koordinaten, die den Start und das Ende der Profilstruktur definieren. Über das zweite Teil des Typattributs der *Edge* wird der Name des 2D-*Graphen* festgelegt, hier `SectionA`. Der *Graph* wird aus dem `OrdnerA` eingeladen, der in dem `Source`-Attribut des *Graphen* definiert ist. Da noch nicht bekannt ist, wie der Querschnitt an der Extrusionsachse orientiert werden soll, wird mit dem `Orientationvector` die Ausrichtung der lokalen Y-Achse des 2D-*Graphen* im globalen Koordinatensystem beschrieben.

3.3 Graphenbasierte Fertigungsrestriktionen

Durch die Verwendung der *Graphen* kann eine große Anzahl an Regeln definiert werden, die die Herstellbarkeit der Optimierungsentwürfe gewährleisten. Diese Regeln analysieren automatisch den geometrischen Aufbau sowie die Verbindungen der Graphenelemente, als auch deren assoziierte Informationen, wie die Dicken und den Lagenaufbau. Da jeder in der Optimierung erzeugte Entwurf die Fertigungsrestriktionen erfüllen muss, kann vermieden werden, dass Simulationsressourcen für Designs vergeudet werden, die für die Herstellung nicht in Frage kommen. Die Restriktionen hängen von dem gewählten Fertigungsverfahren ab. In diesem Abschnitt werden die Fertigungsrestriktionen vorgestellt, die in der GHT für ein Tapewickelprofil definiert werden können. Dieses Verfahren wird in der Arbeit als Herstellverfahren berücksichtigt, da in dem angegliederten DFG-Projekt Demonstratoren im Tapewickelverfahren gefertigt werden. Die in dieser Arbeit beschriebene Methodik und die Fertigungsrestriktionen können jedoch mit relativ wenig Aufwand künftig auch für das Pultrusionsverfahren erweitert werden.

3.3.1 Allgemeine Fertigungsrestriktionen

Ortmann (2015) nennt in seiner Dissertation folgende allgemeine Fertigungsrestriktionen, die für Aluminiumstrangpressprofile entwickelt wurden:

1. Minimale und maximale Wanddicken
2. Mindestabstände zwischen den Wänden der Profile
3. Minimale Winkel zwischen verbundenen *Edges*
4. Non-Design-Space, in dem keine Strukturen existieren dürfen

Trotz des abweichenden Fertigungsverfahrens, können diese Restriktion auch sinnvoll in der Optimierung von FKV-Profilen eingesetzt werden, auch wenn die Grenzen hier sinnvoll angepasst werden müssen. Die erlaubten Werte werden dafür in der Konfigurationsdatei angegeben. Die minimale und maximale Wandstärke wird für jede Dicke der *Chambers* und *Edges* überprüft. Bei FKV-Profilen ist es empfehlenswert, als Grenzen ein Vielfaches der minimalen Lagendicke festzulegen, die im Fall von Wickelprofilen der Dicke der verwendeten Tapes entspricht. Es ist zu beachten, dass wenn *Chambers* aneinandergrenzen, pro *Chamber* die maximale Dicke erreicht werden kann und an den Verbindungsstellen somit die doppelte Dicke vorliegen kann. Dies sollte bei der Wahl der Grenze berücksichtigt werden.

Zur Überprüfung der Mindestabstände wird die Innen- und Außenseite jeder *Edge* mit je 100 Punkte beschrieben (unter Berücksichtigung der Wanddicken) und die Abstände zu den Punkten aller anderen *Edges* überprüft, die nicht an einen gleichen *Vertex* grenzen. Wenn die *Edges* an einen gemeinsamen *Vertex* grenzen, wird stattdessen der minimale Winkel zwischen den beiden *Edges* überprüft.

Die Definition des Non-Design-Space erfolgt über beliebig viele Punktpfade, durch die keine *Edges* verlaufen dürfen. Dazu werden alle *Edges* wieder mit 100 Punkten diskretisiert und geprüft, ob einer der Punkte innerhalb einer der Non-Design-Space-Pfade liegt. Auf die gleiche Weise kann ein Design-Space definiert werden, innerhalb dem alle *Edges* verlaufen müssen. Die Pfade werden später auch bei der Festlegung der Variablen in der Formoptimierung berücksichtigt. Des Weiteren wird geprüft, ob der *Graph* eine Verschneidung der *Edges* aufweist und ob die *Edges* eine vorgegebene minimale Länge unterschreiten.

Neben den genannten Restriktionen können Symmetrien für den *2D-Graphen* definiert werden. Es stehen folgende Möglichkeiten für den 2D-Querschnitt zur Verfügung:

- Keine Symmetrie
- Symmetrie in X-Richtung
- Symmetrie in Y-Richtung
- Symmetrie in X- und Y-Richtung

Die Verwendung von Symmetrien hat den Nachteil, dass der Entwurfsraum eingeschränkt wird und dadurch schlechtere Designs gefunden werden können. Als Vorteil werden in den Optimierungen durch Symmetrien in einem Schritt zumeist mehrere *Edges* symmetrisch in den *Graphen* eingezogen, wodurch die Optimierung in der Regel mit weniger Iterationen und somit Funktionsaufrufen auskommt. Da die Symmetrien auch bei der Festlegung von Variablen in den Formoptimierungen berücksichtigt werden, kommen diese bei einer aktiven Symmetrie auch mit weniger Funktionsaufrufen aus. Durch die Symmetrie können außerdem fertigungsbedingte Vorteile entstehen. So können im Fall von Wickelstrukturen die gewickelten Profile mehrmals im Querschnitt verwendet werden, wodurch weniger verschiedene Wickelkerne hergestellt werden müssen. Die Symmetrie des *Graphen* wird in den Fertigungsrestriktionen überprüft. Neben der Form wird bei FKV-Strukturen auch überprüft, ob die symmetrischen Graphenelemente den gleichen Lagenaufbau verwenden. Um die symmetrischen *Graphen* zu erzeugen, werden alle Geometrieänderungen durch die Heuristiken symmetrisch ausgeführt, sodass in dem Ablauf dann keine unsymmetrischen Designs mehr entstehen. Den symmetrischen Graphenelementen wird dabei der gleiche Lagenaufbau zugewiesen. Bei der Verwendung von Symmetrien muss das vorgegebene initiale Design, mit dem eine Optimierung startet, symmetrisch sein, um die geforderten Fertigungsrestriktionen zu erfüllen und mit der Optimierung starten zu können. Die vorgestellten Fertigungsrestriktionen, die für alle *Graphen* aktiviert werden können, sind in **Abbildung 3-3** zusammengefasst.

3.3.2 Restriktionen für Chambers

Für die *Chambers* ergeben sich weitere Restriktionen, die geprüft werden können:

- Eine maximal zulässige *Chamber*-Anzahl
- Geschlossenheit der *Chamber*

- Konvexität der *Chamber*
- Minimale Größe der *Chamber*, inklusive einer minimalen Umfangslänge

Die maximal zulässige *Chamber*-Anzahl wird in der Konfigurationsdatei vorgegeben und mit der Anzahl der in dem *Graphen* vorhandenen *Chambers* verglichen. Schon beim Einladen eines *Graphen* wird geprüft, ob alle *Chambers* geschlossen sind. Ist dies nicht der Fall, gibt das Verfahren eine Fehlermeldung aus. Im Ablauf der GHT selbst entstehen keine offenen *Chambers*, sodass diese Überprüfung nicht mehr erfolgen muss.

Die Prüfung der Konvexität der *Chambers* erfolgt hingegen ohne weitere Angaben. Sie wird überprüft, um Hinterschnitte zu vermeiden, die nicht oder nur bedingt in dem Wickelprozess hergestellt werden können. Bei der Prüfung wird über die zugehörigen *Edges* iteriert und kontrolliert, ob die jeweils folgende *Edge* immer zur gleichen Seite gedreht ist oder gerade verbunden ist. Wenn mindestens eine *Edge* zur anderen Seite gedreht ist, ist die *Chamber* nicht konvex. **Abbildung 3-4** zeigt die Prüfung einer konvexen *Chamber*.

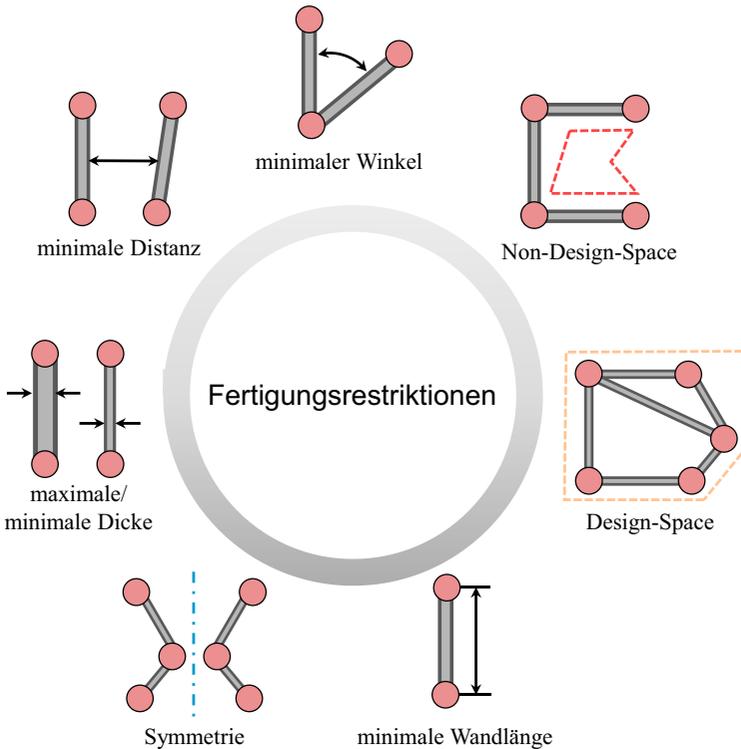


Abbildung 3-3: Funktionsweise der allgemeinen Fertigungsrestriktionen

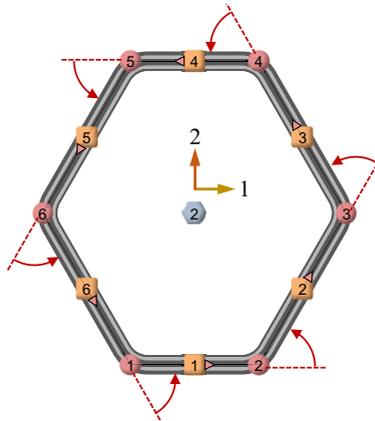


Abbildung 3-4: Überprüfung der Konvexität einer Chamber

Zuletzt wird überprüft, ob die Chambers an allen Edge-Übergängen groß genug sind, um den minimalen inneren Wickelradius zu gewährleisten. Der minimale Wickelradius wird in der Konfigurationsdatei definiert, um Fertigungsprobleme zu vermeiden. Dazu gehört das Verdrutschen des Tapes auf scharfen Kanten des Querschnitts bei zu großen Vorschüben und das Abheben des Tapes bei zu kleinen Radien durch die hohe Steifigkeit der Fasern. Dazu wird intern der verrundete Verlauf der Chamber bestimmt und überprüft, ob sich die Verrundungen überlagern. In diesem Fall erfüllt die Chamber nicht die Fertigungsrestriktionen. **Abbildung 3-5** zeigt ein Beispiel einer Chamber mit drei verschiedenen Verrundungsradien. Während die Verrundungen mit den kleinen und mittleren Radien hier erzeugt werden können und die Chamber die Fertigungsrestriktionen erfüllt, überlappen sich die Verrundungen für den größten gewählten Radius, sodass dieser nicht hergestellt werden kann.

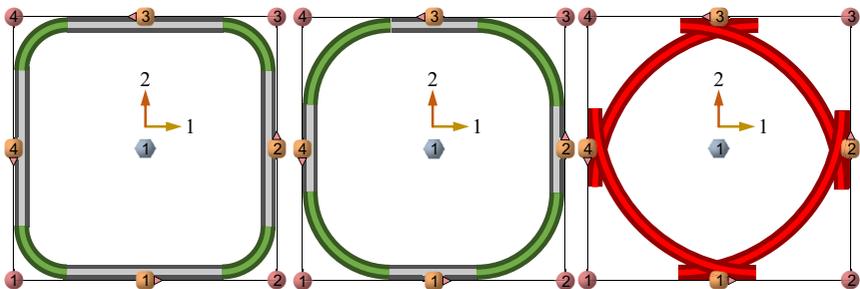


Abbildung 3-5: Überprüfung der Verrundungen einer Chamber mit einem kleinen Radius (links), einem mittleren Radius (Mitte) und einem zu groß gewählten Radius (rechts), sodass sich in dem letzten Fall die Verrundungen überlappen und nicht erzeugt werden können

Zusätzlich kann über einen Parameter die minimale Umfangslänge der *Chamber* angegeben werden, um die Bildung sehr kleiner *Chambers* vermeiden zu können. Hierbei wird bei inneren *Chambers* der äußere Umfang gewählt und bei äußeren *Chambers* der innere Umfang, da diese beiden Maße unabhängig von der *Chamber*-Dicke sind, da sie direkt an den *Edges* anliegen. Würde stattdessen die Umfangslänge in der Mittelfläche bestimmt, wäre die Länge abhängig von der Dicke der *Chamber*, da die Mittelfläche mit zunehmender Dicke nach innen oder außen wandern würde.

Dadurch könnten Designs in den Dimensionierungen nach einer Dickenänderung die minimale Umfangslänge unterschreiten, wenn eine Dimensionierung mit einem Entwurf startet, der die minimale Umfangslänge gerade erfüllt. **Abbildung 3-6** zeigt für einen Beispielgraph die geprüften Umfänge als rote Linien. Der kürzeste Pfad gehört in dem Beispiel zu der *Chamber* 4 oben rechts im Querschnitt, die über die Abfolge der *Edges* 5, 3 und 9 beschrieben wird. Die analysierte Länge bezieht sich bei dieser inneren *Chamber* auf den äußeren Umfang.

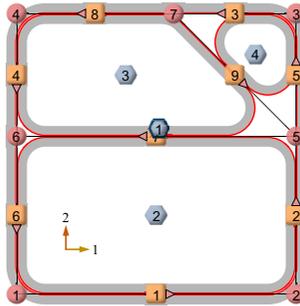


Abbildung 3-6: Graph mit rot hervorgehobenen Umfängen, deren Längen geprüft werden

3.3.3 Restriktionen für den Lagenaufbau

In Abhängigkeit von den Halbzeugen und dem Fertigungsverfahren, können sich bei der Herstellung von FKV-Profilen Restriktionen für den Lagenaufbau ergeben. Eine Wicklung mit 0°-Orientierung parallel zur Profilachse erlaubt keine kontinuierliche Wicklung, da das Tape dann nach jeder Bahn abgeschnitten und neu angesetzt werden muss. Auf gleiche Weise sind 90°-Wicklungen nicht möglich, da das Tape bei jeder Umdrehung des Profils mindestens um die Tapebreite weiterlaufen muss, damit das Tape sich nicht mit sich selbst überlappt. Je größer die Orientierung und somit je näher zur Umfangsrichtung, desto geringer ist die Gefahr, dass das Tape beim Wickeln z. B. auf einer Verrundung abrutscht. Um die minimal und maximal möglichen Winkel für das Fertigungsverfahren festzulegen, können in der Konfigurationsdatei minimal und maximal zulässige Winkel angegeben werden. Falls ein Lagenaufbau

mit einer unzulässigen Orientierung vorliegt, wird diese auf die minimal oder maximal zulässige Grenze korrigiert (unter Beibehaltung des Vorzeichens).

Des Weiteren soll das Tape in den Wickelprozessen immer um ein Vielfaches der Tapedicke pro Umwicklung weiterwandern, damit die Tapes später aneinander liegen und sich weder innerhalb einer Lage überlappen, noch eine Lücke zwischen den Tapes entstehen lassen. Aus diesen Anforderungen resultieren diskrete Orientierungen, die gewickelt werden können. Veranschaulicht wird dieses Problem in **Abbildung 3-7**, in der drei Rohre skizziert sind, in der das Tape pro Umwicklung um eine Tapebreite (links), zwei Tapebreiten (Mitte) und drei Tapebreiten (rechts) gewandert ist. Somit ist es nötig, dass die Lagenwinkel α im *Graphen* in Abhängigkeit von der Tapebreite b_{Tape} und der Umfangslänge O_{L} einer Lage L korrigiert werden. Die Information der Tapebreite muss in der Konfigurationsdatei hinterlegt sein. Als erstes wird mit der folgenden Formel berechnet, wie viele aneinandergrenzende Tapebahnen N_{TapeL} eingesetzt werden müssen, um die angestrebte Orientierung zu erzielen:

$$N_{\text{TapeL}} = \frac{O_{\text{L}}/\tan \alpha}{b_{\text{Tape}}/\sin \alpha} = \frac{O_{\text{L}} \cdot \cos \alpha}{b_{\text{Tape}}} \quad (3-1)$$

Dieser Wert wird nun auf eine Ganzzahl gerundet und unter Berücksichtigung des vorherigen Winkelvorgezeichens die neue Orientierung durch die Umstellung der Formel berechnet. Falls sich nach der Rundung von N_{TapeL} ein Wert von 0 ergibt, wird der Wert auf 1 korrigiert. Durch das Vorgehen können aneinandergrenzende Lagen mit einer eigentlich gleichen Orientierung durch die unterschiedlichen Umfangslängen eine leicht abweichende korrigierte Orientierung erhalten. Falls die Korrektur unerwünscht ist, kann in der Konfigurationsdatei das Vorgehen deaktiviert werden indem der Parameter `isWinding` mit `false` besetzt wird.

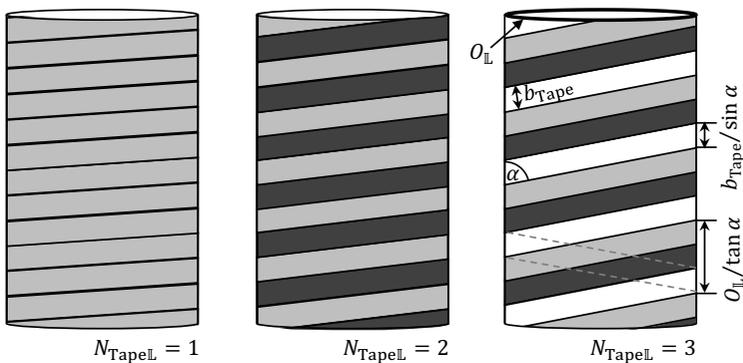


Abbildung 3-7: Rohrwicklung, bei der das Tape pro Umdrehung um eine Tapebreite (links), zwei Tapebreiten (Mitte) und drei Tapebreiten (rechts) weiterwandert

4 Generierung der Finite Elemente Modelle

4.1 Automatisierte Modellerzeugung mit einem Präprozessor

Nachdem der *Graph* vorgestellt wurde, der sämtliche geometrischen Informationen beinhaltet, kann nun der Prozess beschrieben werden, um den *Graphen* in ein FE-Modell zu überführen. Die FE-Modelle werden für die Berechnungssoftware LS-DYNA (im Folgenden "Solver" genannt) erzeugt. Die Aufgabe des Präprozessors ist die Erzeugung des zugehörigen Inputdecks, dessen Inhalte (*Keywords*) im Folgenden immer wieder benannt werden. Der Prozess muss hierbei vollständig automatisiert ablaufen, da während den Optimierungen hunderte FE-Modelle erzeugt werden müssen. Die eigentliche Erstellung des FE-Modells erfolgt mit dem Präprozessor HyperMesh der Firma Altair Engineering. Dieser lässt sich unter anderem durch Befehle in der Tool Command Language (TCL) ansprechen und kann durch deren Abarbeitung das FE-Modell nach und nach aufbauen. Die notwendigen TCL-Befehle werden mit einer in der GHT integrierten Schnittstelle erzeugt, die als Input den *Graphen* und einige Parameter aus der Konfigurationsdatei erhält, um damit die nötige TCL-Datei zu erzeugen.

Im ersten Schritt wird in der TCL-Datei angefordert, das vom Anwender als Basis bereitgestellte FE-Gesamtmodell einzuladen, das in dem Ordner *loadcase* abgelegt ist. Dieses FE-Modell muss alle Einstellungen, Informationen zu dem Lastfall und die nötigen Interaktionen wie Kontakte zwischen der durch den *Graphen* beschriebenen Struktur und den anderen Bauteilen enthalten. Über die automatische Bereitstellung verschiedener Gruppen mit den Elementen und Komponenten des *Graphen* können die Kontakte und andere Funktionalitäten einfach definiert werden. Der Vorteil des Einladens des gesamten FE-Modells besteht darin, dass der Präprozessor ID-Konflikte vermeidet und somit keine IDs in dem FE-Modell vorab für die neuen Strukturen reserviert werden müssen. Durch die Schnittstelle werden die Graphenelemente dann in geometrische Flächen überführt, die im Anschluss vernetzt werden können. Das Vorgehen erlaubt es, im Optimierungsprozess neue Graphenelemente zu integrieren, indem lediglich definiert werden muss, wie das Graphenelement in eine Geometrie überführt werden muss und welche Interaktionen zu anderen Graphenelementen bestehen. Danach werden noch Kontakte und Verbindungen innerhalb der Struktur definiert und Komponenten, Eigenschaften und Materialien zugewiesen. Die neu erzeugten Elemente werden dabei in ein eigenes Inputdeck geschrieben, sodass dieses später z. B. leicht verschoben oder rotiert werden kann. Neben der internen Massenberechnung durch die GHT wird die Masse der Graphenstrukturen auch durch den Präprozessor ermittelt und in die Datei *mass.info* geschrieben, sodass diese in den Optimierungen bequem als Strukturantwort eingeladen werden kann. Um andere Körper zur Beschreibung des Lastfalls passend positionieren zu können, werden verschiedene Parameter, wie die äußere Wanddicke und die Koordinaten des kleins-

ten Rechtecks, das den 2D-*Graphen* umschließt, als Parameter in das Inputdeck herausgeschrieben, sodass diese z. B. für Translationen der anderen Körper genutzt werden können. So kann z. B. eine Lagerung unabhängig von der Wandstärke immer im gleichen Abstand zu der Struktur positioniert werden.

4.2 Einschalige Modellierung des Lagenaufbaus

Bei der einschaligen Modellierung wird jede *Edge* und *Chamber* jeweils mit einer Schicht an FE-Schalenelementen modelliert. Im ersten Schritt wird für alle *Edges* und *Chambers* mit zugewiesenen Dicken in der XY-Ebene eine Linie entlang der Mittelfläche erstellt. Der genaue Pfad wird intern berechnet und berücksichtigt die nötigen Abstände zu den angrenzenden Graphenelementen, basierend auf ihren Dicken. Die Ecken der *Chambers* sind so verrundet, dass unter Berücksichtigung ihrer Dicke der geforderte minimale Innenradius eingehalten werden kann. Eine Ausnahme stellt die äußere *Chamber* dar, da sie sich bei den Verrundungsradien jeweils an den angrenzenden Radien der inneren *Chambers* orientiert. In **Abbildung 4-1** (b) sind die in der X-Y-Ebene erzeugten Mittellinien für die *Chambers* des beispielhaften *Graphen* aus **Abbildung 4-1** (a) dargestellt. Der *Graph* besitzt zwei innere und eine äußere *Chamber*. Die geraden Linien und Bögen werden zwischen temporär erzeugten Punkten eingezeichnet. Im nächsten Schritt wird der Querschnitt zum Start-*Vertex* der 3D-*Edge* verschoben und so rotiert, dass er normal zur angestrebten Profilachse steht und die Y-Achse des lokalen Querschnitts (2-Achse) in Richtung des in der 3D-*Edge* hinterlegten Orientierungsvektors zeigt (**Abbildung 4-1** (c)). In diesem Schritt wird auch die Extrusionslinie modelliert, die im Anschluss genutzt wird, um den Querschnitt entlang dieser Linie zu extrudieren und so die Flächen der Struktur zu erhalten. Diese können danach mit einer vorgegebenen Elementkantenlänge vernetzt werden um die Finiten Elemente zu erzeugen (**Abbildung 4-1** (d)). Die *Chambers* grenzen aneinander oder können einen vorgegebenen Offset zur Berücksichtigung der Dicke von Klebeschichten aufweisen. Der gewünschte Wert kann in der Konfigurationsdatei angegeben werden.

Den Finiten Elementen eines Graphenelements wird im Anschluss eine Komponente zugewiesen, die wiederum auf ein Material und weitere Eigenschaften verweist, wie z. B. die Art der Elemente und die Dicke. Je nach Art des Materials werden hier verschiedene Definitionen für den Solver genutzt. Wenn es sich um ein isotropes Material mit einer Lage handelt, wird ein Keyword `*PART` erzeugt und auf das im Graphenelement angegebene Material referenziert. In dem Keyword `*SECTION_SHELL` wird die Dicke und die in der Konfigurationsdatei angegebene Anzahl der Integrationspunkte über die Dicke der Finiten Elemente eingesetzt. Wenn es sich jedoch um ein FKV handelt, wird stattdessen ein Keyword `*PART_COMPOSITE` erzeugt. Für jede Lage werden hier die Material-ID, die Dicke und der Orientierungswinkel in Referenz zu dem Materialkoordinatensystem eingegeben. Jede Lage entspricht in dem `*PART_COMPOSITE` einem Integrationspunkt über die Dicke. Wenn für einen FKV

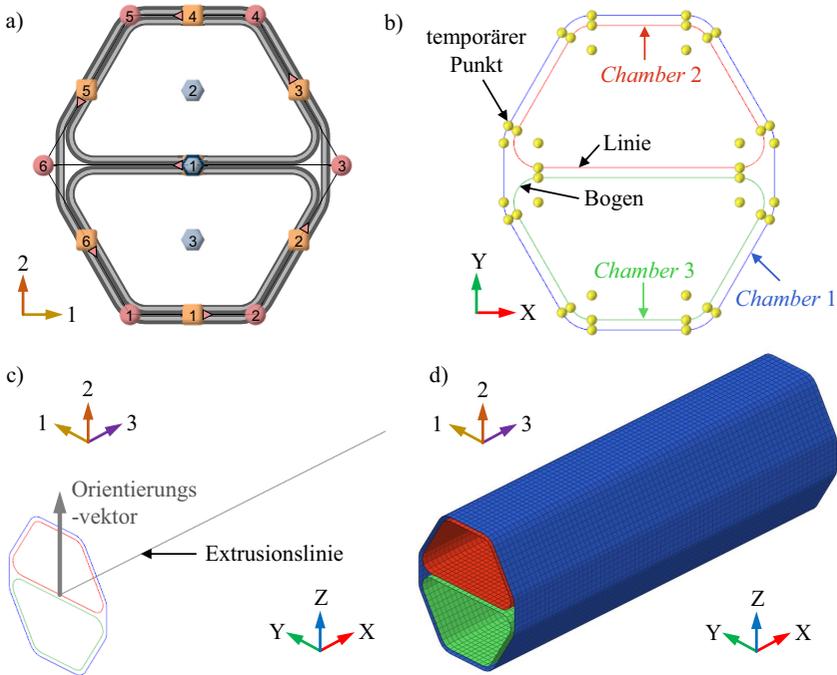


Abbildung 4-1: Erstellung der FE-Modelle mit der Visualisierung des verwendeten Beispielgraphen (a), der Modellierung der Mittellinien der drei Chambers mit geraden Linien und Bögen, erzeugt in der XY-Ebene zwischen temporären Punkten (b), der Transformation des Querschnitts und die Erstellung der Extrusionslinie (c), sowie die Extrusion des Querschnitts, um die Flächen zu erhalten und diese dann mit Schalenelementen zu vernetzen (d)

nur eine Lage angegeben ist, wird ein normales *PART mit einem eigenen Material mit der korrekten Orientierung erzeugt. Wenn das FKV aus zwei Lagen besteht, werden die beiden Lagen doppelt in dem *PART_COMPOSITE erzeugt, jeweils mit den halben Dicken, wodurch vier statt nur zwei Integrationspunkte über die Dicke genutzt werden.

4.3 Mehrschalige Modellierung des Lagenaufbaus

Wenn durch die Simulationsmodelle die Delamination von FKV-Lagen innerhalb eines Graphenelements abgebildet werden soll, müssen die jeweiligen Lagenaufbauten durch mehrere übereinanderliegende und verbundene Schalenschichten modelliert werden. Über einen Parameter in der Konfigurationsdatei kann diese Art der Modellierung definiert werden. Um dem

Anwender die Entscheidungsfreiheit zu lassen, alle Lagen jeweils durch eine eigene Schalenschicht zu modellieren oder bestimmte Lagen zusammenzufassen, können mehrere Lagen zu Lagengruppen zusammengefasst werden (siehe Abschnitt 3.2). Jede Lagengruppe wird dann analog wie in Abschnitt 4.2 als eine Schalenschicht in der Mittelfläche der Lagengruppe erzeugt, wobei auch hier jede Lage einem Integrationspunkt in dem *PART_COMPOSITE entspricht. Falls eine Lagengruppe nur eine Lage aufweist, wird diese Lage im FE-Modell in drei Lagen aufgeteilt, sodass mindestens drei Integrationspunkte vorhanden sind. Bei zwei Lagen in einer Lagengruppe werden diese analog in insgesamt vier Lagen aufgeteilt. Falls in der Lagengruppe nur eine Lage eines isotropen Materials definiert ist, wird ein *PART erzeugt. Mehrere definierte Lagengruppen mit jeweils nur einer Lage eines isotropen Materials könnten dann z. B. miteinander verklebten Blechen entsprechen.

Je mehr einzelne Lagengruppen erzeugt werden, desto größer wird die Anzahl der Finiten Elemente und notwendigen Verbindungen und somit auch der Simulationsaufwand, sodass es sinnvoll ist, die Anzahl der Lagengruppen gering zu halten. Innerhalb der Lagengruppe kann dann natürlich keine Delamination mehr abgebildet werden. Eine gute Möglichkeit ist Lagen mit der gleichen Orientierung zu einer Lagengruppe zusammen zu fassen. Damit werden Delaminationen von Schichten unterschiedlicher Orientierung simulierbar.

Nachdem das Netz der ersten Lagengruppe analog zu der einschaligen Modellierung erzeugt wird, werden die weiteren Lagengruppen als Offset des vorhandenen Netzes erstellt. Dies hat zudem den Vorteil, dass die Netze perfekt übereinander liegen und so einfach mit Volumenelementen verbunden werden können, um die Verbindung zu modellieren. In **Abbildung 4-2**

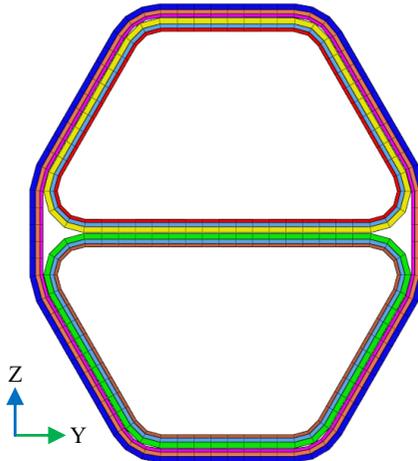


Abbildung 4-2: Querschnitt mit mehreren Schalenelementschichten, die jeweils mit ihren Dicken visualisiert sind

ist der in **Abbildung 4-1** (d) vorgestellte Querschnitt mit nun drei Schalenelementschichten pro *Chamber* dargestellt. Die Schalenelemente sind auch hier mit ihren Dicken visualisiert.

4.4 Kontakte und Klebelemente zwischen den Komponenten

Nachdem die Elemente zur Repräsentation der Strukturen erstellt wurden, ist es nötig, automatisiert Kontakte zu definieren und die verschiedenen Komponenten miteinander zu verbinden. Wie in **Abbildung 4-3** dargestellt, müssen hierbei einerseits die Lagen eines Profils untereinander verbunden werden und andererseits benachbarte Profile, da diese miteinander verklebt und umwickelt sind.

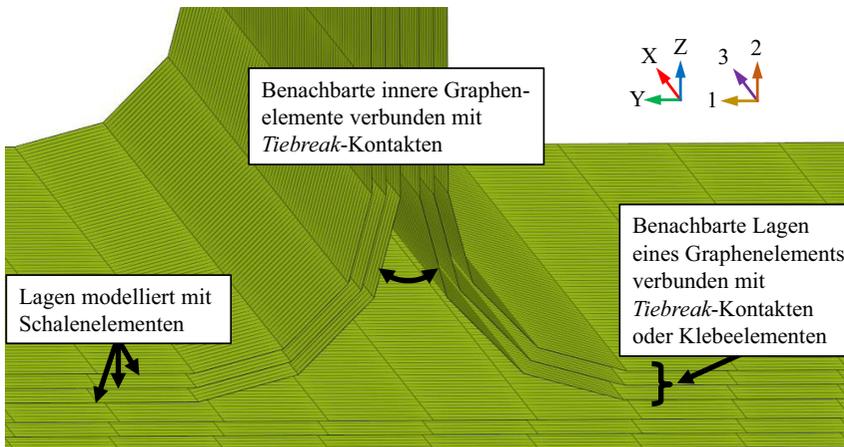


Abbildung 4-3: Übersicht der Verbindungsmodellierung in einem FE-Modell mit *Tiebreak*-Kontakten zwischen den mit Schalenelementen modellierten Lagen und zwischen den äußeren Lagen benachbarter Strukturen

Als erstes werden mehrere Schalenelementlagen eines Graphenelements miteinander verbunden. In der Realität ergibt sich diese Verbindung während des Wickelprozesses durch die Verbindung der thermoplastischen Matrix in dem Aufschmelzungsprozess beim Ablegen des Tapes. Hier muss nun eine entsprechende Verbindung zwischen den Lagen in den FE-Modellen realisiert werden. Die Ansprüche an die Verbindung sind, dass diese sich lösen kann, um eine Delamination abbilden zu können und dass die Verbindung einen möglichst geringen zusätzlichen Simulationsaufwand mit sich bringt. Die erste Möglichkeit ist, Hexae-derelemente zwischen den Schalenelementen der Lagen zu modellieren. Die Vernetzung gestaltet sich durch das Vorgehen in Abschnitt 4.3 sehr einfach, da die Schalenelementschichten bereits durch Offsets erzeugt wurden und so ideal übereinander liegen. Die Volumenelemente

können analog zu dem Vorgehen durch einen Offset erzeugt werden. Ohne die übereinanderliegende Vernetzung wäre die Verbindung mit den Volumenelementen deutlich schwerer realisierbar. Die Volumenelemente sind nötig, um den Abstand zwischen den Schalenelementen zu überbrücken und diese miteinander zu verbinden, in den realen Strukturen entsprechen sie jedoch der Verschweißung der Tapebahnen und haben somit streng genommen keine physikalische Ausdehnung. **Abbildung 4-4** zeigt das Beispiel aus **Abbildung 4-3**, hier jedoch mit Hexaederelementen zwischen den mit Schalenelementen modellierten Lagen.

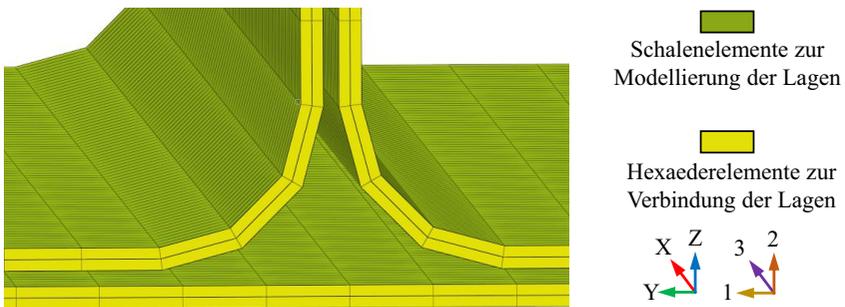


Abbildung 4-4: Verbindung der mit Schalenelementen modellierten Lagen einer *Chamber* durch Hexaederelemente

Als Materialmodell wird für den Solver ein `*MAT_COHESIVE_MIXED_MODE` verwendet. Hierbei handelt es sich um ein elastisches Kohäsivmodell mit Versagen, das einen geringen Ressourcenbedarf hat. Weitere Infos hierzu finden sich in dem LS-DYNA-Handbuch (LST 2020b).

Als Elementformulierung für die Volumenelemente wird `ELFORM 20` verwendet, die für die Verbindung von Schalenelementen und den Einsatz des Materials `*MAT_COHESIVE_MIXED_MODE` notwendig ist. Die Elementformulierung koppelt die relativen Verschiebungen der angrenzenden Elementknoten mit nichtlinearen Federelementen. Für weitere Informationen zu der Elementformulierung sei auch hier auf das LS-DYNA-Handbuch verwiesen (LST 2020a).

Statt der Hexaederelemente kann alternativ ein *Tiebreak*-Kontakt eingesetzt werden, der innerhalb einer bestimmten Distanz die FE-Knoten einer Lage mit den FE-Elementen der angrenzenden Lage verbindet. Der *Tiebreak*-Kontakt hält die Verbindung aufrecht, bis ein vorgegebenes Versagenskriterium erreicht wird und fungiert danach als konventioneller Kontaktalgorithmus. Durch die Verwendung von `OPTION=11` in dem Kontakt, wird auf das Versagensmodell von `*MAT_COHESIVE_MIXED_MODE` zugegriffen, sodass ein ähnliches Verhalten zu den Hexaederelementen mit diesem Material erreicht werden kann. Weitere Details zu dem Kontakt finden sich in (LST 2020a).

Neben der Verbindung der Schichten eines Graphenelements müssen die Elemente benachbarter Graphenelemente verbunden werden. Dies entspricht einerseits der in der Einleitung skizzierten Verklebung der inneren Wickelprofile und andererseits die sich anschließende Umwicklung der inneren Profile mit zusätzlichen äußeren Lagen im Tapewickelprozess. An dieser Stelle können nur die *Tiebreak*-Kontakte verwendet werden, da die Schalenelemente benachbarter Graphenelemente nicht sauber übereinander liegen und somit nicht durch Hexaederelemente verbunden werden können. Um alle Nachbarpaarungen zu bestimmen, wird über alle *2D-Edges* des *Graphen* iteriert und der Kontakt zwischen den angrenzenden Lagen der *Chambers* definiert, bzw. zwischen den äußeren Lagen der *Edge* und der jeweils angrenzenden Lage der *Chamber*, falls die *Edge* eine Dicke und somit eigene Finite Elemente aufweist. Da die gleichen *Chambers* an mehreren *Edges* aneinandergrenzen können, wird ein Kontakt nur erzeugt, wenn zwischen den Kontaktpartnern noch kein Kontakt definiert ist, um doppelte Kontakte zu vermeiden. Da für die Klebungen ein Klebespalt notwendig sein kann, kann in der Konfigurationsdatei eine Dicke für Klebespalte eingegeben werden. Diese Dicke wird im gesamten Ablauf berücksichtigt und passt auch die Geometrien der zugehörigen *Chambers* an, um den geforderten Spalt zu gewährleisten.

Da die Verklebung der inneren Profile andere Materialeigenschaften aufweisen kann, wie die Verbindungen, die aus dem Wickelprozess resultieren, können für die beiden Arten von Verbindungen jeweils eigene Parametersätze definiert werden, die in den FE-Modellen eingesetzt werden.

Zuletzt ist ein Selbstkontakt für die Struktur nötig und ggf. noch weitere Kontakte zu anderen Bauteilen oder Impaktoren. Diese werden jedoch nicht durch die Schnittstelle erzeugt, da diese im vom Anwender bereitgestellten Inputdeck vorgesehen werden können. Wenn es gewünscht ist, können hierbei die automatisch erzeugten Gruppen der Finiten Elemente und Komponenten des *Graphen* angesprochen werden.

4.5 Zuweisung der Faserorientierung

Bei der Zuweisung der Materialien in dem FE-Modell muss den Komponenten bei isotropen Materialien lediglich die richtige Material-ID zugewiesen werden. Bei anisotropen Materialien müssen hingegen die Orientierungen berücksichtigt und individuell für jede Komponente angepasst werden. Als angestrebte Orientierung verläuft die 0° -Richtung immer parallel zur Profilachse und die 90° -Richtung dementsprechend in der Umfangsrichtung der Wickelprofile (siehe **Abbildung 4-5**).

Um dies zu ermöglichen wird für jede *3D-Edge* das Originalmaterial dupliziert und die Orientierung entsprechend angepasst. Als Orientierungsmethode wird in LS-DYNA die dort verfügbare Option `AOPT=3` verwendet (LST 2020b). Als Input wird hierbei der Vektor \mathbf{v} übergeben, der der Richtung der Profilachse entspricht. In einem ersten Schritt wird dieser Vektor

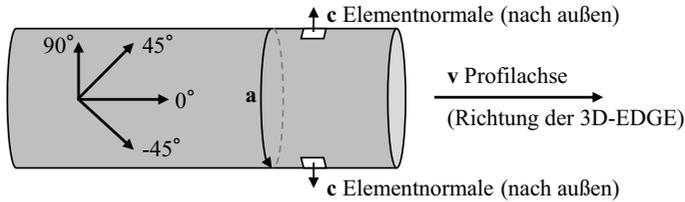


Abbildung 4-5: Verwendete Orientierung bei den Profilen

auf die Elementebene projiziert. Zusammen mit der Elementnormale **c**, die im Vernetzungsprozess nach außen orientiert wurde, kann im Anschluss das Kreuzprodukt bestimmt werden, um die Materialhaupttrichtung **a** zu erhalten. Wie in **Abbildung 4-5** eingezeichnet, verläuft diese Haupttrichtung **a** damit in der Umfangsrichtung des Profils und noch nicht wie angestrebt in Richtung der Profilachse. Um dies zu ändern, wird in dem Keyword für das Material der Parameter `BETA` mit 90° angegeben, der die Materialrichtung nochmal um den angegebenen Winkel um die Elementnormale dreht, sodass die 0° -Orientierung danach in Richtung der Profilachse verläuft und die 90° -Orientierung wie skizziert in der Umfangsrichtung. Die einzelnen Schichten des Lagenaufbaus erhalten ihre individuelle Orientierung mit der Angabe ihrer im *Graphen* definierten Winkel in dem `*PART_COMPOSITE`, der die Haupttrichtung jeweils nochmal um den angegebenen Winkel um die Elementnormale dreht.

4.6 Modellierung zusätzlicher Verstärkungsschichten

Wenn in einem *Graphen* sowohl den *Chambers* als auch den *Edges* eine Dicke zugewiesen wird, werden die *Edges* als Verstärkungsschichten interpretiert. Bei den Wickelprofilen könnten in einem weiteren Prozessschritt in axialer Richtung zusätzliche Tapelagen abgelegt werden oder bei pultrudierten Profilen zusätzliche Gewebe oder Gelege mit durch das Werkzeug gezogen werden. Jeder *Edge* kann eine eigene Dicke und ein eigener Lagenaufbau zugewiesen werden, sodass in dem *Graphen* zielgerichtet Verstärkungen definiert werden können. Durch einen Parameter in der Konfigurationsdatei können die Verstärkungsschichten automatisch eingekürzt werden, sodass diese bei den einsetzenden Verrundungen der *Chambers* enden. Alternativ können die gewünschten Längen der Verstärkungsschichten für jede *Edge* separat definiert werden.

In **Abbildung 4-6** (a) ist ein Beispielgraph mit einer Breite und Höhe von 100 mm abgebildet, der vier *Edges* und eine innere *Chamber* besitzt. Die *Edges* sind 1,5 mm dick und werden als Verstärkungsschicht interpretiert. Mit der in **Abbildung 4-6** (b) angegebenen Syntax, werden die Verstärkungsschichten von beiden Seiten um 30 % bzw. 30 mm eingekürzt. Das zugehörige FE-Modell mit dem Finiten Elementen der *Chamber* (blau) und der Verstärkungsschicht

(orange) ist in **Abbildung 4-6** (c) präsentiert und zeigt für die *Edge* 1 das Einkürzen durch die relative Positionsangabe entlang der *Edge* und für *Edge* 3 durch die absoluten Abstände vom Start und Ende der *Edge*. **Abbildung 4-6** (d) zeigt alternativ das FE-Modell, in dem die

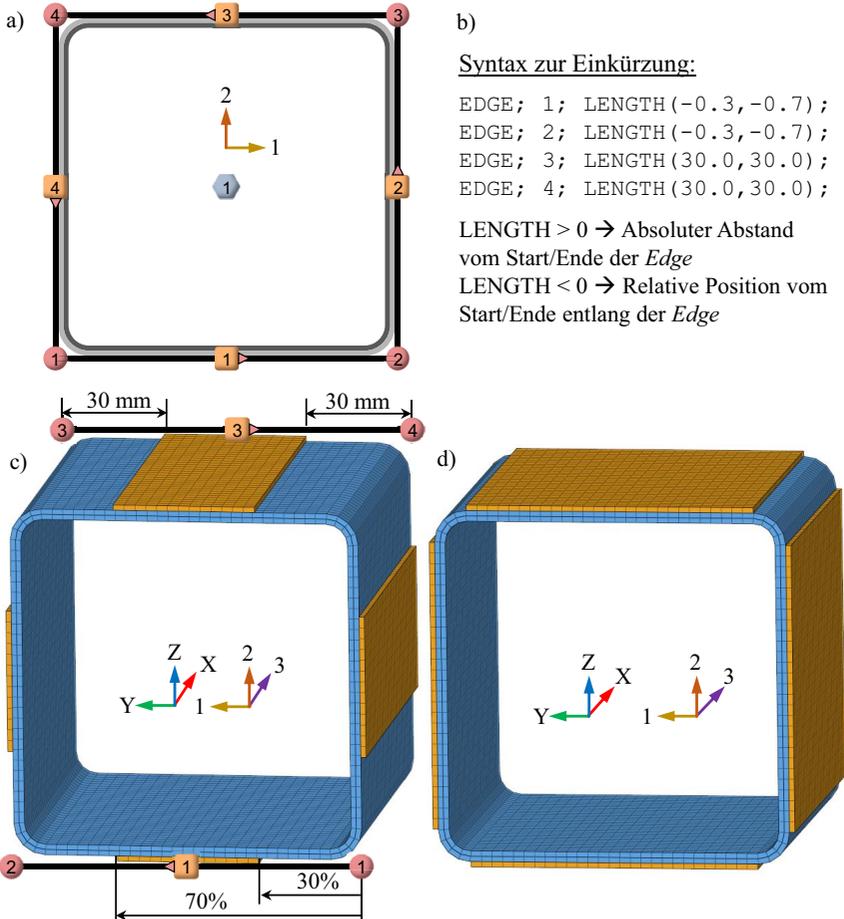


Abbildung 4-6: Erzeugung von Verstärkungsschichten, erklärt mit einem Beispielgraph (a), der notwendigen Syntax zur Festlegung der Länge der Verstärkungsschichten (b), dem abgeleiteten FE-Modell (c) und einem weiteren FE-Modell, in dem die äußeren Verstärkungsschichten automatisch so in ihrer Länge angepasst werden, dass sie vor den Verrundungen enden (mit dick visualisierten Schalenelementen)

Verstärkungsschichten automatisch so in ihrer Länge angepasst werden, dass sie an den Verdrehungen der inneren *Chamber* enden. Die Verbindung zwischen den angrenzenden Elementen der *Chamber* und der *Edges* wird, wie in Abschnitt 4.4 beschrieben, automatisch mit *Tiebreak*-Kontakten erzeugt.

Abbildung 4-7 zeigt ein weiteres Beispiel mit zwei inneren und einer äußeren *Chamber* mit automatisch eingekürzten Verstärkungen zwischen den vertikalen Wänden. Die selektive Verstärkung in eine bestimmte Richtung wird dadurch erreicht, dass nur den vertikal verlaufenden *Edges* eine Dicke zugewiesen wird. Durch die Verwendung der Verstärkungsschichten können somit noch mehr Modellierungsfreiheiten zur Verfügung gestellt werden.

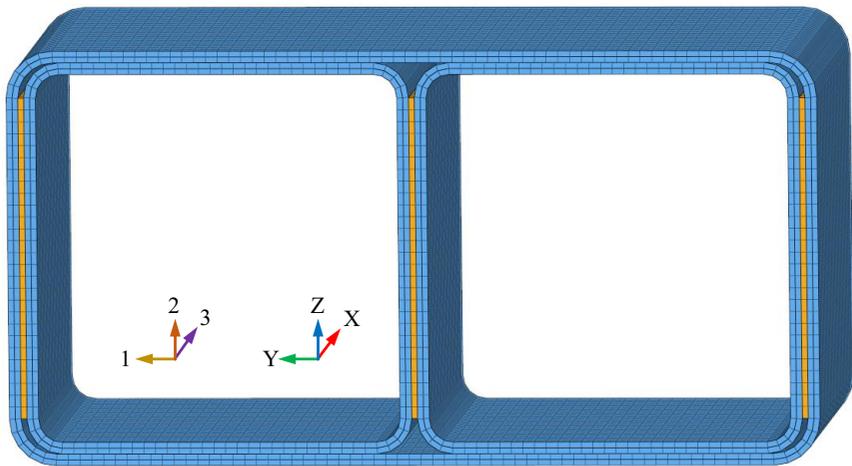


Abbildung 4-7: FE-Modell (mit dick visualisierten Schalenelementen) basierend auf einem *Graphen* mit zwei inneren und einer äußeren *Chamber* mit Verstärkungsschichten zwischen den vertikalen Wänden der *Chambers*, die dadurch erreicht werden, dass den vertikal verlaufenden *Edges* eine Dicke zugewiesen wird

4.7 Verschnitt der Profilenden mit einer vorgegebenen Fläche

Falls es erforderlich ist, dass ein Profil an seinen Enden nicht mit einer geraden Fläche abschließt, kann optional eine *Step*-Datei mit einer oder mehreren Verschnittflächen in der Konfigurationsdatei angegeben werden. Noch vor der Vernetzung der Profilgeometrie, werden die zugehörigen erzeugten Flächen des Profils automatisch durch den Präprozessor mit der vorgegebenen Geometrie in der *Step*-Datei verschnitten und die überstehenden Flächen aus

dem Modell gelöscht. Ein Beispiel für ein verschnittenes Profil ist in **Abbildung 4-8** dargestellt. Das Ende wurde hierbei mit der transparent dargestellten Fläche verschnitten.

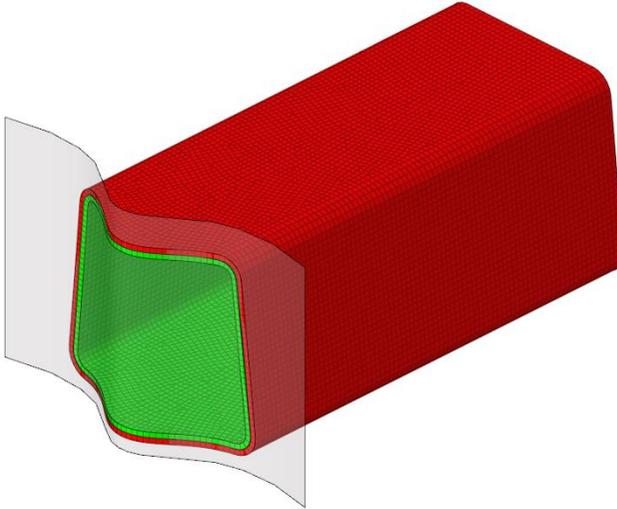


Abbildung 4-8: FE-Modell einer Profilstruktur mit einem verschnittenen Ende (die Schalenelemente sind dick visualisiert)

5 Einsatz von Heuristiken zur Strukturverbesserung

Im Umfeld der GHT stellen die Heuristiken auf Expertenwissen basierende Regeln dar, die Änderungen an der Struktur vorschlagen, mit dem Ziel das Crashverhalten positiv zu beeinflussen und das Material effizient einzusetzen. Um dies zu erreichen, analysieren sie die Simulationsdaten, um z. B. bestimmte Deformationsformen erkennen zu können, oder das Energieabsorptionsverhalten in der Struktur auszuwerten. Darauf basierend schlagen die Heuristiken Änderungen an der Querschnittsgeometrie der Profile, sowie bei FKV auch Änderungen am Lagenaufbau vor.

5.1 Analyse der Simulationsdaten

5.1.1 Aufteilung der Simulationsdaten in ein regelmäßiges Raster

Ortmann (2015) zieht innerhalb der Profilstrukturen eine Analyseebene normal zur Profilachse ein und fordert die detaillierten Informationen der angrenzenden FE-Knoten und -Elemente mit Koordinaten, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Energien in den Ausgabedateien an. Diese Analyseebene wird von den Heuristiken analysiert. Nicht immer kann jedoch von vornherein festgestellt werden, welcher Abschnitt eines Profils analysiert werden muss, sodass eine oder selbst mehrere positionierte Analyseebenen nicht das ganze Deformationsverhalten der Struktur erfassen können. Besonders Deformationen in Richtung der Profilachse können bei der Auswertung einer Analyseebene nicht berücksichtigt werden. Außerdem wird die Auswertung des Strukturverhaltens erschwert, wenn die Strukturen sich wie bei einem fahrenden Fahrzeug im Raum bewegen und während eines Unfalls teilweise sogar in Rotation versetzt werden. Darum werden zwei Maßnahmen umgesetzt, die diese Herausforderungen angehen:

- Die Simulationsdaten der FE-Knoten (Koordinaten, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen) werden so im Raum transformiert, dass die Extrusionsstruktur möglichst genau der lokalen Z-Achse (3-Achse) folgt und die Ausrichtung des Querschnitts im lokalen XY-Koordinatensystem (1- und 2-Richtung) des *Graphen* beibehalten wird. Lokale Deformation bleiben dabei erhalten, nicht jedoch Bewegungen die aus den angrenzenden Strukturen und dem System resultieren. In anderen Worten wird eine idealisierte Starrkörperbewegung herausgerechnet. Die lokalen Achsen werden in den Bildern, in Abgrenzung zum globalen Koordinatensystem, mit den Bezeichnungen 1, 2 und 3 dargestellt.
- Anstatt der Analyseebene wird ein regelmäßiges Raster über die komplette Struktur gelegt, sodass alle Bereiche der Struktur ausgewertet werden und zugleich eine effiziente und schnelle Datenverarbeitung möglich ist.

Als erste Notwendigkeit für diese Maßnahmen müssen die Simulationsdaten aller FE-Knoten und -Elemente der Struktur eingeladen werden. Hierbei eignet sich die Arbeit mit den binären Ergebnisdateien (*d3plot*) am besten, da die nicht binären Dateien (*nodout*, *elout*) im *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII) einen deutlich größeren Speicherbedarf aufweisen und dadurch nur langsamer verarbeitet werden können. Im Falle des Solvers LS-DYNA werden darum die binären *d3plot*-Dateien importiert und die relevanten Simulationsdaten ausgelesen. Dazu gehören für die FE-Knoten die Koordinaten, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sowie für die Finiten Elemente die Energiedichten, Dehnungen und Spannungen über die Zeit. Hierbei ist es empfehlenswert, dass die Binärdaten mindestens 30 Zeitpunkte enthalten, um das Crashgeschehen in den Daten ausreichend abbilden zu können. Zusätzlich wird ausgelesen, welche Knoten zu welchen Elementen und welchen Komponenten gehören und welche Energien die Komponenten über die Zeit aufnehmen. Zuletzt werden auch die Löszeitpunkte von Finiten Elementen erfasst.

Im nächsten Schritt werden die Simulationsdaten der FE-Knoten von dem globalen Koordinatensystem zurück in das bereits vorgestellte lokale Profilkkoordinatensystem transformiert. Die nötigen Translationen und Rotationen sind bekannt, da das FE-Netz der Profilstruktur bei der Modellerzeugung im Profilkkoordinatensystem erzeugt wurde und anschließend zu der benötigten Position verschoben und gedreht wurde. Die dafür notwendigen Operationen müssen lediglich in umgekehrter Reihenfolge rückgängig gemacht werden.

Danach werden die Starrkörperbewegungen aus den Knotenkoordinaten herausgerechnet, die sich im zeitlichen Verlauf ergeben haben können. In **Abbildung 5-1** wird der Prozess an einem deformierten Profil skizziert. Zuerst wird die Profilachse mit allen Knoten des Profils für jeden Zeitpunkt parallel zur lokalen Z-Achse (3-Achse) gedreht, falls Rotationen um die X- oder Y-Achse erfolgt sind (**Abbildung 5-1** (a)). Dazu wird der Schwerpunkt der Koordinaten am Beginn des Profils bestimmt sowie am Ende und die Verbindung von beiden Punkten entlang der lokalen Z-Achse (3-Achse) durch Rotationen ausgerichtet. Falls durch Elementlöschung am Start oder Ende mehr als 20 % der Daten nicht mehr vorhanden sind, wandert die Position iterativ um die verwendete Elementkantenlänge entlang der Profilachse weiter, bis ausreichend Daten vorhanden sind.

Danach werden die Koordinaten so verschoben, dass der Schwerpunkt des Profils zum betrachteten Zeitpunkt dem Schwerpunkt am Beginn der Simulation entspricht (**Abbildung 5-1** (b)). Zuletzt muss eine möglicherweise stattgefundenene Rotation um die Profilachse herausgerechnet werden (**Abbildung 5-1** (c)). Dazu werden die Koordinaten der Knoten am Start und Ende des Profils jeweils in 45° Schritten komplett um die Profilachse gedreht und jeweils ihre Abstände zu den Koordinaten des initialen Zeitpunkts berechnet und aufsummiert. Von den beiden Winkeln mit den geringsten summierten Abständen wird für jeden Zeitpunkt die Methode des goldenen Schnitts gestartet, um die genauen Winkel auszumachen, um die sich das Profil am Start und am Ende um die eigene Achse gedreht hat. Abweichungen zwischen dem Winkel am Start und Ende deuten auf eine torsionsartige Verdrehung hin (der Torsionswinkel

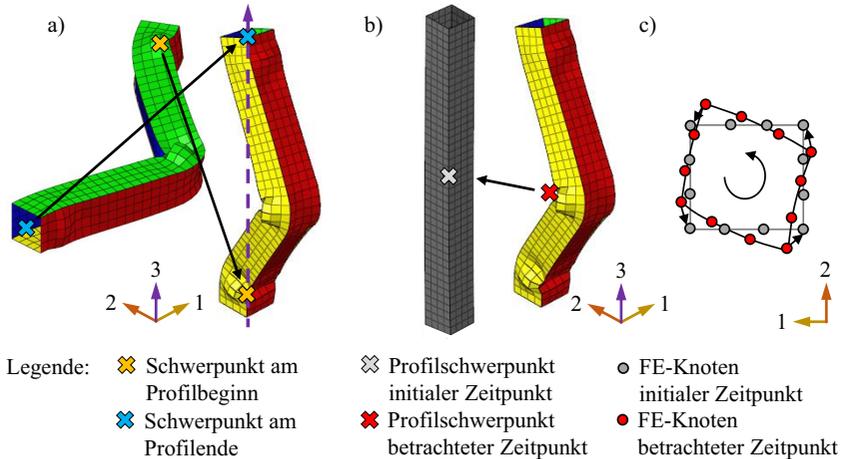


Abbildung 5-1: Notwendige Schritte zum Herausrechnen der Starrkörperbewegungen aus den Verschiebungen eines deformierten Profils im lokalen Koordinatensystem, durch die Ausrichtung der Schwerpunkte am Beginn und Ende des Profils in Richtung der lokalen 3-Achse (a), gefolgt von der Verschiebung des Profils, sodass dessen Schwerpunkt mit dem des initialen Zeitpunkts zusammenfällt (b) und eine abschließenden Rotation des Profils um die lokale 3 Achse, sodass der summierte Abstand zu den Finite Elemente Knoten des initialen Zeitpunkts minimiert wird (c)

φ_{P} wird gespeichert und den Heuristiken später als Information zur Verfügung gestellt). Im letzten Schritt wird das Profil zu jedem Zeitpunkt um den Durchschnitt der beiden Winkel um die eigene Profilachse zurückgedreht. Die Knotengeschwindigkeiten und -beschleunigungen sowie die Elementspannungen werden analog im gesamten Prozess mit transformiert. Die **Abbildung 5-2** zeigt ein weiteres Beispiel mit den Simulationsdaten eines Profils im globalen Koordinatensystem (links) und im lokalen Koordinatensystem ohne Starrkörperbewegungen (Mitte). Es sei betont, dass das Herausrechnen der Starrkörperbewegungen und die Transformation ins lokale Koordinatensystem das dargestellte Deformationsverhalten nicht verändern, sondern lediglich das betrachtete Koordinatensystem.

Damit die Heuristiken arbeiten können, benötigen sie die Information, welche Knoten und Elemente wo auf den *Edges* und den *Chambers* liegen. Da alle Knoten und Elemente in dem FE-Modell einer Komponente zugewiesen sind, ist bekannt zu welcher *Edge* oder *Chamber* sie gehören. Die Positionen auf den *Edges* und *Chambers* werden zum initialen Zeitpunkt mit den Koordinaten des Netzes im lokalen Koordinatensystem bestimmt. Mit der lokalen Z-Koordinate kann zuerst die Position entlang der Profilachse bestimmt werden, da am Start des Profils die Position 0 vorliegt und am Ende des Profils die Position 1. Bei der Benutzung von

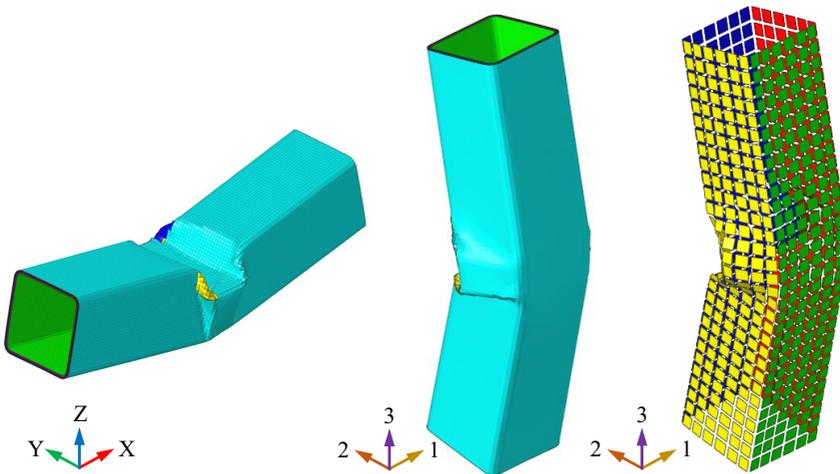


Abbildung 5-2: Geschädigtes FKV-Profil im globalen Koordinatensystem (links), nach der Koordinatentransformation ins lokale Profilkoordinatensystem (Mitte) und die zugehörige Visualisierung des Rasters (rechts)

Chambers ist die Information im FE-Modell nicht vorhanden, zu welchen *Edges* die Simulationsdaten jeweils assoziiert werden können, da ihnen dort nur die Komponente der *Chamber* zugewiesen wird. Darum muss für jeden Knoten einer *Chamber* in der lokalen XY-Ebene der Abstand zu den zugehörigen 2D-*Edges* bestimmt werden und diejenige *Edge* ausgewählt werden, die den geringsten Abstand zum Knoten aufweist. Im Anschluss kann der Knoten auf die zugehörige *Edge* projiziert werden und so die Position entlang der *Edge* ermittelt werden. Der Prozess ist beispielhaft in **Abbildung 5-3** für einen Knoten auf einem Profil veranschaulicht. Der Knoten liegt bei der Position 0,73 auf der Profilachse und im Querschnitt weist er den geringsten Abstand zu *Edge 1* der zugehörigen *Chamber* auf und befindet sich auf dieser bei der Position 0,18.

Nachdem bekannt ist, welche FE-Knoten mit welcher *Edge* assoziiert werden, kann ein Raster über die Wände der einzelnen 2D-*Edges* des Profils gelegt werden und für die einzelnen Rasterfelder Durchschnittswerte der Simulationsdaten für jeden Zeitpunkt bestimmt werden. Dieses Vorgehen hat folgende Vorteile:

- Mit dem regelmäßigen Raster können die Daten sehr effizient in mehrdimensionalen Matrizen gespeichert werden, die schnelle Zugriffs- und Verarbeitungszeiten gewährleisten und verhältnismäßig wenig Speicher in Anspruch nehmen.

- Durch die Speicherung der Daten in Matrizen kann nativ auf die Informationen der Nachbarfelder zugegriffen werden, indem man Einträge hoch oder runter wandert, ohne bestimmen oder speichern zu müssen, welche Finiten Elemente an das aktuell betrachtete Element grenzen.
- Die Arbeit mit dem Raster mit gemittelten Werten erlaubt eine einfachere und zuverlässigere Auswertung des Deformationsgeschehens, da bei der Modellierung von mehreren Schalenelementlagen nicht alle Lagen einzeln analysiert werden müssen und einzelne Elemente, die sich nach dem Versagen unrealistisch deformieren oder sich von der Struktur lösen, die Auswertungen der Heuristiken weniger beeinflussen.

Mit einer vorgegebenen Länge l_{ax} der Felder des Rasters in Richtung der Profilachse (folgend als axial bezeichnet), kann zusammen mit der Gesamtlänge des Profils in axialer Richtung L_{ax} , die Anzahl der axialen Felder $N_{ax} = L_{ax}/l_{ax}$ berechnet und auf eine Ganzzahl gerundet werden. Mit einer vorgegebenen Länge l_{lat} der Felder senkrecht dazu, in Richtung der 2D-Edge (folgend als lateral bezeichnet), kann analog mit der Länge der Edge in lateraler Richtung L_{lat} die Anzahl der lateralen Felder N_{lat} bestimmt werden. Die Elemente und Knoten können wie in **Abbildung 5-4** dargestellt, ihrer Position entsprechend, den Feldern des Rasters zugeordnet werden. Für jeden der insgesamt N_t Zeitpunkte können nun Durchschnittswerte der Simulationsgrößen für jedes Feld berechnet werden, wobei die gemittelten Größen

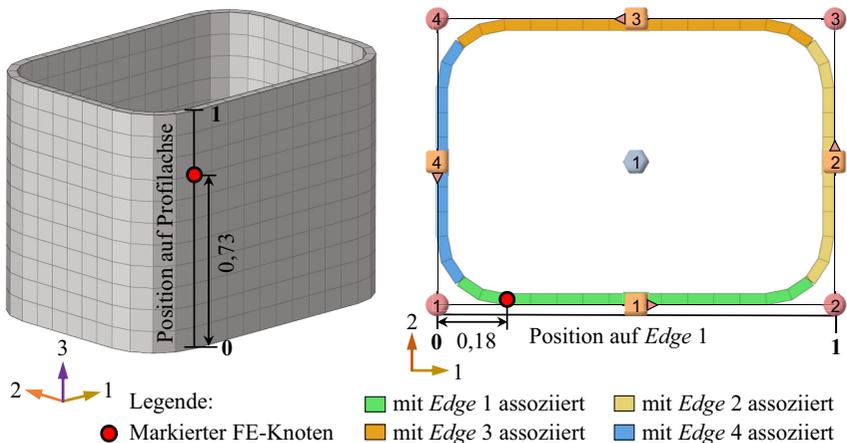


Abbildung 5-3: Bestimmung der Position eines FE-Knotens einer Chamber entlang der Profilachse bzw. 3D-Edge im lokalen Koordinatensystem (links) und auf der am nächsten liegenden 2D-Edge der Chamber mit der ID 1 in der lokalen Querschnittsansicht (rechts), mit dick visualisierten Schalenelementen und einer farblichen Hervorhebung, die die Assoziation der Finiten Elemente zu den am nächsten liegenden 2D-Edges zeigt (rechts)

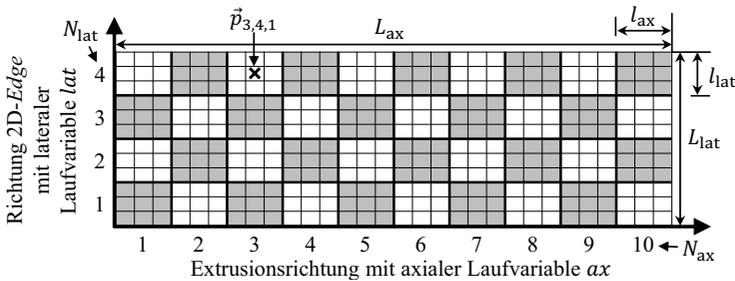


Abbildung 5-4: Die Finiten Elemente einer *Edge*, die eine Wand eines Profils bilden, sind in ein Raster aus 10 mal 4 Feldern aufgeteilt, hier mit jeweils 9 Elementen pro Rasterfeld

einem Skalar oder einem Vektor mit z. B. X-, Y- und Z-Komponenten des lokalen Koordinatensystems entsprechen. Die Daten werden dementsprechend in einem drei- oder vierdimensionalen Array bzw. einer Matrix gespeichert. Für die lokalen Koordinaten der Felder ergibt sich ein vierdimensionales Array $\underline{p}^{N_{ax} \times N_{lat} \times N_t \times 3}$, in dem für jedes Feld und jeden Zeitpunkt der Durchschnittswert der Koordinaten der enthaltenen FE-Knoten abgelegt ist. Analog erhält man vierdimensionale Arrays für die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Die erste Dimension definiert die Position in axialer Richtung (Laufvariable ax), die zweite Dimension die Position in lateraler Richtung (Laufvariable lat), die dritte Dimension den Index des Zeitpunkts (Laufvariable t) und die vierte Dimension bildet den Koordinatenvektor in dem lokalen Profilkordinatensystem. In **Abbildung 5-2** (rechts) ist die Visualisierung eines Rasters gezeigt, das für das Beispiel in **Abbildung 5-2** (Mitte) ermittelt wurde. Jedes Element entspricht in der Visualisierung einem Feld des Rasters bei dessen gemittelter Koordinate. Zur besseren Visualisierung wurden die Elemente um die gemittelten Koordinaten eingezeichnet und zu den Nachbarfeldern ausgerichtet. Es ist ersichtlich, dass das Raster noch die Informationen der ursprünglichen Deformation enthält und nun die Vorteile der einfachen Auswertbarkeit bietet.

Das Raster weist den weiteren Vorteil auf, dass in jedem Feld ausgewertet werden kann, wie groß der Anteil der noch vorhandenen FE-Elemente bzw. Knoten ist. Gerade bei FKV, aber auch anderen Materialien mit Versagenskriterien, kann es zu Versagensereignissen kommen, die Teile der Struktur abtrennen und durch den Raum fliegen lassen oder sie so stark schädigen, dass die Verformung ohne nennenswerten Widerstand stattfindet. Ab diesem Moment sind Auswertungen des Deformationsverhaltens nicht mehr sinnvoll, da die Heuristiken dann zu falschen Schlussfolgerungen kommen können und z. B. in weniger sinnvollen Bereichen der Struktur Änderungen vorschlagen. Heuristiken, die die Deformation analysieren, werten darum die Informationen eines Feldes nur bis zu dem Zeitpunkt aus, in dem noch mehr als 50 % der FE-Knoten weder gelöscht sind noch an ein gelöschtes Element angrenzen.

5.1.2 Auswertung des Rasters hinsichtlich der Deformation

Nach der Festlegung des Rasters mit der Bestimmung der zugehörigen Simulationsdaten, kann das Deformationsverhalten des Rasters ausgewertet werden und durch verschiedene Kennwerte den Heuristiken als Information zur Verfügung gestellt werden. So werden z. B. Längenänderungen und Krümmungen zwischen den Feldern des Rasters für alle Zeitpunkte analysiert. Die Auswertung wird nur so lange fortgeführt, bis in mehr als 10 % der Felder jeweils mehr als 10 % der FE-Knoten gelöscht wurden oder an gelöschte Elemente begrenzt haben.

Zuerst wird für alle Zeitpunkte und Felder der relative Abstand $d_{\text{rel,ax}}$ aller Felder zu ihrem Nachbarn in axialer Richtung im Verhältnis zu deren initialem Abstand ermittelt:

$$d_{\text{rel,ax}}(ax, lat, t) = \frac{|\vec{p}_{ax,lat,t} - \vec{p}_{ax+1,lat,t}|}{|\vec{p}_{ax,lat,1} - \vec{p}_{ax+1,lat,1}|} \quad (5-1)$$

$$\text{für } ax \in \{1, N_{\text{ax}} - 1\}; lat \in \{1, N_{\text{lat}}\}; t \in \{1, N_t\}.$$

Der Vektor \vec{p} wird aus dem Koordinatenarray \underline{P} des Rasters abgefragt. Am axialen Ende des Rasters wird kein Wert berechnet, da dort kein weiterer axialer Nachbar vorliegt. Die Werte werden in dem Array $\underline{D}_{\text{rel,ax}}^{N_{\text{ax}}-1 \times N_{\text{lat}} \times N_t}$ gespeichert. Werte > 1 deuten somit einer Verlängerung und Werte < 1 eine Verkürzung an. Für den relativen Abstand $d_{\text{rel,lat}}$ aller Felder zu ihrem lateralen Nachbarn mit dem Array $\underline{D}_{\text{rel,lat}}^{N_{\text{ax}} \times N_{\text{lat}}-1 \times N_t}$ wird analog vorgegangen:

$$d_{\text{rel,lat}}(ax, lat, t) = \frac{|\vec{p}_{ax,lat,t} - \vec{p}_{ax,lat+1,t}|}{|\vec{p}_{ax,lat,1} - \vec{p}_{ax,lat+1,1}|} \quad (5-2)$$

$$\text{für } ax \in \{1, N_{\text{ax}}\}; lat \in \{1, N_{\text{lat}} - 1\}; t \in \{1, N_t\}.$$

Leicht abgewandelt wird für jede Reihe auch noch die relative Längenänderung in lateraler Richtung zwischen dem ersten und letzten Feld in lateraler Richtung $d_{\text{rel,latRow}}$ erfasst und in dem Array $\underline{D}_{\text{rel,latRow}}^{N_{\text{ax}} \times N_t}$ gespeichert:

$$d_{\text{rel,latRow}}(ax, t) = \frac{|\vec{p}_{ax,N_{\text{lat}},t} - \vec{p}_{ax,1,t}|}{|\vec{p}_{ax,N_{\text{lat}},1} - \vec{p}_{ax,1,1}|} \quad \text{für } ax \in \{1, N_{\text{ax}}\}; t \in \{1, N_t\}. \quad (5-3)$$

Neben den Längenänderungen in dem Raster werden auch verschiedene Krümmungsänderungen erfasst. Für die Bestimmung der axialen Krümmungsänderung c_{ax} wird der Vektor von der Position eines Felds zu seinem nächsten axialen Nachbarn bestimmt sowie der Vektor von der Position des vorherigen axialen Nachbarn zu dem betrachteten Feld. Die beiden Vektoren werden noch auf die Ebene E_{lat} projiziert, die normal zu der lateralen Richtung des Rasters ausgerichtet ist und der Winkel zwischen ihnen berechnet (Operator \sphericalangle). Um nur Änderungen der Krümmung zu erfassen, wird zu allen Zeitpunkten der initiale Krümmungswert

abgezogen. Zuletzt wird der Winkel durch die axiale Feldlänge l_{ax} geteilt. Die Formel lautet wie folgt:

$$c_{ax}(ax, lat, t) = \frac{\angle \left((\vec{p}_{ax+1,lat,t} - \vec{p}_{ax,lat,t}) || E_{lat}, (\vec{p}_{ax,lat,t} - \vec{p}_{ax-1,lat,t}) || E_{lat} \right)}{l_{ax}} - \frac{\angle \left((\vec{p}_{ax+1,lat,1} - \vec{p}_{ax,lat,1}) || E_{lat}, (\vec{p}_{ax,lat,1} - \vec{p}_{ax-1,lat,1}) || E_{lat} \right)}{l_{ax}} \quad (5-4)$$

für $ax \in \{2, N_{ax} - 1\}$; $lat \in \{1, N_{lat}\}$; $t \in \{1, N_t\}$.

Die Werte werden in dem Array $\underline{C}_{ax}^{N_{ax}-2 \times N_{lat} \times N_t}$ gespeichert. Die Werte habe die Einheit $^\circ$ /verwendete Längeneinheit, also in der Regel $^\circ$ /mm. Analog werden die lateralen Krümmungsänderungen berechnet, die Projektionen findet nun jedoch auf die Ebene E_{ax} normal zur axialen Richtung statt:

$$c_{lat}(ax, lat, t) = \frac{\angle \left((\vec{p}_{ax,lat+1,t} - \vec{p}_{ax,lat,t}) || E_{ax}, (\vec{p}_{ax,lat,t} - \vec{p}_{ax,lat-1,t}) || E_{ax} \right)}{l_{lat}} - \frac{\angle \left((\vec{p}_{ax,lat+1,1} - \vec{p}_{ax,lat,1}) || E_{ax}, (\vec{p}_{ax,lat,1} - \vec{p}_{ax,lat-1,1}) || E_{ax} \right)}{l_{lat}} \quad (5-5)$$

für $ax \in \{1, N_{ax}\}$; $lat \in \{2, N_{lat} - 1\}$; $t \in \{1, N_t\}$.

Das zugehörige Array lautet $\underline{C}_{lat}^{N_{ax} \times N_{lat} - 2 \times N_t}$. Zuletzt werden Krümmungsänderungen c_n in der Ebene E_n normal zum Raster erfasst und in dem Array $\underline{C}_n^{N_{ax}-2 \times N_{lat} \times N_t}$ gespeichert:

$$c_n(ax, lat, t) = \frac{\angle \left((\vec{p}_{ax+1,lat,t} - \vec{p}_{ax,lat,t}) || E_n, (\vec{p}_{ax,lat,t} - \vec{p}_{ax-1,lat,t}) || E_n \right)}{l_{ax}} - \frac{\angle \left((\vec{p}_{ax+1,lat,1} - \vec{p}_{ax,lat,1}) || E_n, (\vec{p}_{ax,lat,1} - \vec{p}_{ax-1,lat,1}) || E_n \right)}{l_{ax}} \quad (5-6)$$

für $ax \in \{2, N_{ax} - 1\}$; $lat \in \{1, N_{lat}\}$; $t \in \{1, N_t\}$.

In **Abbildung 5-5** sind die drei Krümmungen für ein deformiertes Raster visualisiert und für eine der Profilwände die Ebenen E_{ax} , E_{lat} und E_n eingezeichnet. Durch das lokale Eindringen eines Körpers sind besonders in axialer Richtung Krümmungen vorhanden. Da die Seitenwände als Folge nach außen beulen, werden lokal laterale Krümmungen detektiert. Dadurch, dass sich die beiden Seitenwände während der Deformation als Folge der Biegung zur Seite neigen, können dort auch Krümmungen um die Rasternormale auftreten.

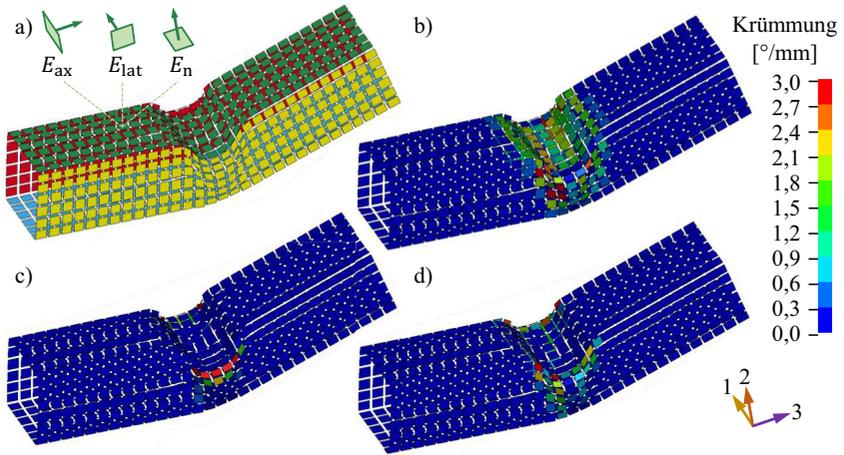


Abbildung 5-5: Raster eines deformierten Profils mit den skizzierten Ebenen E_{ax} , E_{lat} und E_n für das Raster der markierten oberen Wand (a) mit aufgetragener Krümmungsänderung in axialer Richtung C_{ax} (b), lateraler Richtung C_{lat} (c) und um die Rasternormale C_n (d)

Neben den bestimmten Krümmungen für jedes Feld zu seinen Nachbarn, werden für jede Reihe in axialer Richtung analog die Winkeländerungen $\alpha_{ax}(lat, t)$ zwischen dem Start und Ende der Reihe berechnet:

$$\alpha_{ax}(lat, t) = \angle \left(\left(\vec{p}_{\frac{1}{5}N_{ax},lat,t} - \vec{p}_{1,lat,t} \right) || E_{lat}, \left(\vec{p}_{N_{ax},lat,t} - \vec{p}_{\frac{4}{5}N_{ax},lat,t} \right) || E_{lat} \right) - \angle \left(\left(\vec{p}_{\frac{1}{5}N_{ax},lat,1} - \vec{p}_{1,lat,1} \right) || E_{lat}, \left(\vec{p}_{N_{ax},lat,1} - \vec{p}_{\frac{4}{5}N_{ax},lat,1} \right) || E_{lat} \right) \quad (5-7)$$

für $lat \in \{1, N_{lat}\}$; $t \in \{1, N_t\}$.

Für die Berechnung wird zuerst die Position bei $\frac{1}{5}$ der Profillänge $\vec{p}_{\frac{1}{5}N_{ax},lat,t}$ mit der Position des ersten axialen Feldes $\vec{p}_{1,lat,t}$ substrahiert, um die axiale Richtung am Start zu bestimmen und analog die Position am Ende des Profils $\vec{p}_{N_{ax},lat,1}$ mit der Position bei $\frac{4}{5}$ der Profillänge $\vec{p}_{\frac{4}{5}N_{ax},lat,1}$ substrahiert, um die axiale Richtung am Ende zu bestimmen. Die Vektoren werden auf die Ebene E_{lat} projiziert und der Winkel zwischen ihnen ermittelt (Winkel in $^{\circ}$). Um nur die Winkeländerung zu erfassen, wird noch der zugehörige Winkel des initialen Zeitpunkts abgezogen. Für α_{lat} und α_n wird in gleicher Weise verfahren:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{lat}}(ax, t) = & \not\propto \left(\left(\vec{p}_{ax, \frac{1}{5}N_{\text{lat}}, t} - \vec{p}_{ax, 1, t} \right) \|E_{ax}, \left(\vec{p}_{ax, N_{\text{lat}}, t} - \vec{p}_{ax, \frac{4}{5}N_{\text{lat}}, t} \right) \|E_{ax} \right) \\ & - \not\propto \left(\left(\vec{p}_{ax, \frac{1}{5}N_{\text{lat}}, 1} - \vec{p}_{ax, 1, 1} \right) \|E_{ax}, \left(\vec{p}_{ax, N_{\text{lat}}, 1} - \vec{p}_{ax, \frac{4}{5}N_{\text{lat}}, 1} \right) \|E_{ax} \right) \quad (5-8) \\ & \text{für } ax \in \{1, N_{ax}\}; t \in \{1, N_t\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_n(lat, t) = & \not\propto \left(\left(\vec{p}_{\frac{1}{5}N_{ax}, lat, t} - \vec{p}_{1, lat, t} \right) \|E_n, \left(\vec{p}_{N_{ax}, lat, t} - \vec{p}_{\frac{4}{5}N_{ax}, lat, t} \right) \|E_n \right) \\ & - \not\propto \left(\left(\vec{p}_{\frac{1}{5}N_{ax}, lat, 1} - \vec{p}_{1, lat, 1} \right) \|E_n, \left(\vec{p}_{N_{ax}, lat, 1} - \vec{p}_{\frac{4}{5}N_{ax}, lat, 1} \right) \|E_n \right) \quad (5-9) \\ & \text{für } lat \in \{1, N_{\text{lat}}\}; t \in \{1, N_t\}. \end{aligned}$$

Gespeichert werden die Daten in den zugehörigen Arrays $\underline{A}_{ax}^{N_{\text{lat}} \times N_t}$, $\underline{A}_{\text{lat}}^{N_{ax} \times N_t}$ und $\underline{A}_n^{N_{\text{lat}} \times N_t}$. Zuletzt wird für jede *Chamber* \mathbb{C} für jeden Zeitpunkt und jede axiale Laufposition die größte ($d_{\max \mathbb{C}}$) und kleinste ($d_{\min \mathbb{C}}$) relative laterale Abstandsänderung zwischen den Feldern der zugehörigen *Edges* \mathbb{E} berechnet. Ein Wert < 0 steht dafür, dass sich Abstände reduziert haben und Werte > 0 dafür, dass Abstände größer geworden sind. Die Formeln dazu lauten wie folgt:

$$\begin{aligned} d_{\max \mathbb{C}}(ax, t) = & \max_{\mathbb{E}_A, \mathbb{E}_B, lat_A, lat_B} \frac{|\vec{p}_{ax, lat_A, t, \mathbb{E}_A} - \vec{p}_{ax, lat_B, t, \mathbb{E}_B}| - |\vec{p}_{ax, lat_A, 1, \mathbb{E}_A} - \vec{p}_{ax, lat_B, 1, \mathbb{E}_B}|}{maxDist_{\mathbb{C}}}, \\ d_{\min \mathbb{C}}(ax, t) = & \min_{\mathbb{E}_A, \mathbb{E}_B, lat_A, lat_B} \frac{|\vec{p}_{ax, lat_A, t, \mathbb{E}_A} - \vec{p}_{ax, lat_B, t, \mathbb{E}_B}| - |\vec{p}_{ax, lat_A, 1, \mathbb{E}_A} - \vec{p}_{ax, lat_B, 1, \mathbb{E}_B}|}{maxDist_{\mathbb{C}}} \quad (5-10) \end{aligned}$$

für $ax \in \{1, N_{ax}\}; lat_A \in \{1, N_{\text{lat } \mathbb{E}_A}\}; lat_B \in \{1, N_{\text{lat } \mathbb{E}_B}\}; t \in \{1, N_t\}; \mathbb{E}_A, \mathbb{E}_B \in \mathbb{C}; \mathbb{E}_A \neq \mathbb{E}_B$.

Der Parameter $maxDist_{\mathbb{C}}$ entspricht hierbei dem größten initialen Abstand innerhalb des Querschnitts der *Chamber*:

$$maxDist_{\mathbb{C}} = \max_{ax, \mathbb{E}_A, \mathbb{E}_B, lat_A, lat_B, ax} |\vec{p}_{ax, lat_A, 1, \mathbb{E}_A} - \vec{p}_{ax, lat_B, 1, \mathbb{E}_B}| \quad (5-11)$$

für $ax \in \{1, N_{ax}\}; lat_A \in \{1, N_{\text{lat } \mathbb{E}_A}\}; lat_B \in \{1, N_{\text{lat } \mathbb{E}_B}\}; \mathbb{E}_A, \mathbb{E}_B \in \mathbb{C}; \mathbb{E}_A \neq \mathbb{E}_B$.

Wenn bei der Berechnung einer der vorgestellten Kennwerte auf die Daten eines Feldes zugegriffen wird und zu dem Zeitpunkt durch Elementversagen mehr als 50 % der Knoten gelöscht wurden oder an ein gelöscht Element grenzten, wird für den Kennwert der Wert des letzten Zeitpunkts hinterlegt, in dem noch ausreichend Simulationsdaten vorhanden waren.

5.1.3 Auswertung der vorliegenden Beanspruchungssituation

Nachdem zahlreiche Kennwerte vorliegen, die die lokalen Deformationen innerhalb der Raster beschreiben, können nun Rückschlüsse über die Art der Deformation bzw. der Beanspruchung gezogen werden. Hierzu werden für verschiedene Arten der Beanspruchungen Lastkriterien zwischen 0 und 1 berechnet, die bei einem Wert von 1 andeuten, dass die jeweilige Art der Belastung deutlich vorliegt und bei 0, dass die Beanspruchung kaum vorliegt. Bei der Ermittlung der entsprechenden Indizes, können mit der Beanspruchungssituation assoziierte Deformationen den Kennwert erhöhen, während unübliche Deformationen diesen entsprechend absenken.

Zuerst wird das Lastkriterium für die axiale Zugbelastung einer *Edge* LC_{ZugE} vorgestellt. Bei der Berechnung werden gewichtete arithmetische Mittel der Arrays der relativen axialen Längung, der axialen Krümmung und der Krümmung um die Rasternormale verwendet. Bei der Bildung des arithmetischen Mittels über alle Felder des Rasters der *Edge*, erhält der erste Zeitpunkt eine Gewichtung von 0,1 und der Letzte eine Gewichtung von 1,0. Dazwischen wird die Gewichtung linear interpoliert. Dies gilt folgend auch für alle weiteren arithmetischen Mittel bei den Berechnungen der weiteren Lastkriterien, wenn nichts Abweichendes angegeben ist, da zu Beginn der Simulation noch keine Deformationen vorliegen und dies die Durchschnittswerte sonst unnötig stark senken würde.

Der in den noch folgenden Formeln verwendete Operator $\nabla_{x_1}^{x_h}(x)$ gibt für einen Wert x über dem Grenzwert x_h den Wert 1 zurück, unter dem Grenzwert x_1 den Wert 0 und dazwischen interpoliert er linear:

$$\nabla_{x_1}^{x_h}(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x > x_h, \\ 0 & \text{für } x < x_1, \\ (x - x_1)/(x_h - x_1) & \text{für } x_1 \leq x \leq x_h. \end{cases} \quad (5-12)$$

Der Operator $\Delta_{x_1}^{x_h}(x)$ gibt hingegen 1 an der unteren Grenze zurück und 0 an der oberen Grenze und interpoliert ebenfalls dazwischen linear:

$$\Delta_{x_1}^{x_h}(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x > x_h, \\ 1 & \text{für } x < x_1, \\ (x_h - x)/(x_h - x_1) & \text{für } x_1 \leq x \leq x_h. \end{cases} \quad (5-13)$$

Die Grenzwerte für die Operatoren werden basierend auf der Auswertung von 17 Simulationen mit verschiedenen Belastungssituationen festgelegt. Bei Bedarf und in neuen Anwendungsbereichen können und sollten die Grenzen nachjustiert werden.

Das Lastkriterium für die axiale Zugbelastung einer *Edge* LC_{ZugE} berechnet sich wie folgt:

$$LC_{\text{ZugE}} = \nabla_{1,001}^{1,005}(\bar{d}_{\text{rel,ax}}) \cdot \Delta_{0,05}^{0,1}(\bar{c}_{\text{ax}}) \cdot \Delta_{0,05}^{0,1}(\bar{c}_n) . \quad (5-14)$$

Die Grenzwerte x_h und x_l werden mit den angegebenen Werten besetzt, da bei einer reinen Zugbelastung eine Dehnung in Zugrichtung stattfindet und keine der genannten Krümmungen im nennenswerten Maße vorkommen sollten. Die zunehmende axiale Längung führt somit zu einem größeren Index, wenn jedoch gleichzeitig die genannten Krümmungen vorkommen, wird der Index reduziert.

Eine *Chamber* bekommt den durchschnittlichen Index der zugehörigen *Edges* zugewiesen, sowie einen Bestrafungsfaktor, wenn in einer der *Edges* eine Verkürzung der axialen Länge vorliegt, da dies aus einer Biegebeanspruchung der *Chamber* resultieren könnte:

$$LC_{\text{ZugC}} = \overline{LC}_{\text{ZugE}} \cdot \nabla_{0,995}^{1,0} \left(\min_{\mathbb{E}} \bar{d}_{\text{rel,ax}} \right) \quad \text{für } \mathbb{E} \in \mathbb{C}. \quad (5-15)$$

Ein weiteres Lastkriterium LC_{AxDruckE} erfasst die axiale Druckbelastung einer *Edge*. Bei der Berechnung wird das gewichtete arithmetische Mittel der relativen axialen Längen $\check{d}_{\text{rel,ax}}$ verwendet, bei dem der erste Zeitpunkt die Gewichtung 0 erhält, der letzte die Gewichtung 1 und dazwischen wird mit einem steigenden Polynom 4. Grades die Gewichtung interpoliert:

$$\check{d}_{\text{rel,ax}} = \frac{\sum_{t \in \{1, N_t\}} d_{\text{rel,ax,t}} \cdot \left(\frac{t}{N_t} \right)^4}{\sum_{t \in \{1, N_t\}} \left(\frac{t}{N_t} \right)^4}. \quad (5-16)$$

Dadurch bekommen die letzten Zeitpunkte die deutlich größte Gewichtung. Die anderen Dimensionen haben eine einheitliche Gewichtung. Analog entspricht $\check{\sigma}_t(d_{\text{rel,ax}})$ auch einem gleich gewichteten Mittel, nun jedoch über die Standardabweichungen der relativen axialen Längen des Rasters je Zeitpunkt. Wenn die Streuung zu groß wird, widerspricht dies einer gleichmäßigen axialen Kompression und senkt somit den resultierenden Index. Bei der Berechnung von LC_{AxDruckE} gibt es die Besonderheit, dass nur Zeitpunkte bis zu einer durchschnittlichen axialen Krümmung der Felder von $\bar{c}_{\text{ax}}(t) < 0,05$ ausgewertet werden. Das Vorgehen ist darin begründet, dass Strukturen unter einer Druckbelastung ausknicken können. Wenn die Deformation nach dem Ausknicken mit analysiert wird, ist es nur noch schwer möglich zu erfassen, ob dies durch eine Druckbelastung ausgelöst wurde. Die gewählte Wichtung weist dem letzten noch ausgewerteten Zeitpunkt die notwendige hohe Gewichtung zu. Die Formel für das Lastkriterium lautet:

$$LC_{\text{AxDruckE}} = \Delta_{0,997}^{0,999}(\check{d}_{\text{rel,ax}}) \cdot \Delta_{0,0005}^{0,0010} \left(\check{\sigma}_t(d_{\text{rel,ax}}) \right). \quad (5-17)$$

Der Kennwert für die *Chamber* entspricht dem Durchschnitt der *Edge*-Werte, mit einem zusätzlichen Faktor, der zu große Streuungen zwischen den *Edge*-Indizes bestraft:

$$LC_{\text{AxDruckC}} = \overline{LC}_{\text{AxDruckE}} \cdot \Delta_{0,01}^{0,03}(\sigma(LC_{\text{AxDruckE}})). \quad (5-18)$$

Als nächstes wird die Beanspruchungssituation durch Torsion in der *Edge* bewertet:

$$LC_{\text{TorsionE}} = \nabla_{1,5}^{3,0} \left(\varphi_{\text{E}} \cdot \frac{L_{\text{boxP}}}{L_{\text{ax}}} \right) \cdot \nabla_{1,5}^{3,0} \left(\varphi_{\text{P}} \cdot \frac{L_{\text{boxP}}}{L_{\text{ax}}} \right) \cdot \min \left(\Delta_{0,5}^{1,0}(\bar{c}_{\text{ax}}), \Delta_{0,5}^{1,0}(\bar{c}_{\text{n}}), \Delta_{20}^{4,0}(\bar{\alpha}_{\text{ax}}), \Delta_{20}^{4,0}(\bar{\alpha}_{\text{n}}) \right). \quad (5-19)$$

Hierbei entspricht φ_{E} dem Torsionswinkel der *Edge*, L_{boxP} dem durchschnittlichen Maß des Rechtecks, das den Profilquerschnitt im undeformierten Zustand umschließt und L_{ax} der initialen Länge des Profils \mathbb{P} in axialer Richtung. Die Werte sind in **Abbildung 5-6** skizziert. Das Längenverhältnis wird berücksichtigt, da größere Querschnitte die Torsion erschweren und längere Profile bei gleicher Torsionsbelastung einen größeren Torsionswinkel begünstigen. Ebenso muss ein ausreichender Drehwinkel φ_{P} des gesamten Profils vorliegen, der in Abschnitt 5.1.1 bei der Transformation des Profils in das lokale Koordinatensystem als Verdrehung zwischen dem Start und dem Ende des Profils bestimmt wurde. Bei einer gleichmäßigen Torsionsdeformation können φ_{E} und φ_{P} gleich sein. Krümmungen bzw. Winkel in axialer Richtung und um die Rasternormale senken den Index bei der Überschreitung der angegebenen Werte. Hierbei werden jedoch nicht alle Werte berücksichtigt, sondern nur der kleinste der vier Werte. Da an den axialen Enden der Profile bei wenigen Elementen lokale Deformation auftreten können und sich diese deutlich auf die durchschnittliche Winkeländerung α auswirken könnten, wird statt dem arithmetischen Mittel der Median über alle Reihen ausgewählt und im Anschluss wieder das gewichtete arithmetische Mittel über die Zeitpunkte gebildet. Der Wert für eine *Chamber* LC_{TorsionC} entspricht dem Durchschnitt der Werte $\overline{LC}_{\text{TorsionE}}$ der zugehörigen *Edges*.

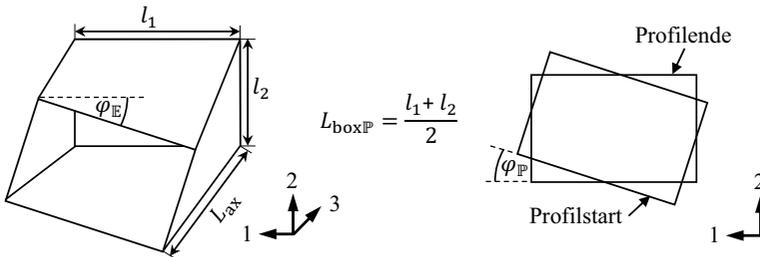


Abbildung 5-6: Skizze eines tordierten Profils

Das nächste Lastkriterium LC_{axBiegE} beschäftigt sich mit der Beanspruchungssituation durch axiale Biegung:

$$LC_{\text{axBiegE}} = \nabla_{0,6}^{3,0} \left(\bar{\alpha}_{\text{ax}} \cdot \sqrt[4]{\frac{L_{\text{boxP}}}{L_{\text{ax}}}} \right) \cdot \Delta_{0,25}^{0,50} \left(\frac{\bar{\alpha}_{\text{lat}}}{\bar{\alpha}_{\text{ax}}} \right). \quad (5-20)$$

Die Biegung kommt zustande, wenn ausreichende Winkeländerungen in der axialen Reihe vorliegen. Ähnlich zu dem Torsionsindex wird dem Verhältnis der durchschnittlichen Breite des Profilquerschnitts und der axialen Länge des Profils eine Beachtung geschenkt, durch das Bilden der vierten Wurzel soll das Verhältnis jedoch einen deutlich geringeren Einfluss bekommen. Breite und kurze Profile haben einen höheren Biege widerstand und den Deformationen soll dadurch eine höhere Gewichtung zugewiesen werden. Falls jedoch das über die Zeit gewichtete gemittelte Verhältnis aus den durchschnittlichen lateralen Winkeländerungen und dem Median der axialen Winkeländerungen über die Reihen einen vorgegebenen Wert überschreitet, wird der Index reduziert. Analog wird das Lastkriterium LC_{nBiegE} für die Biegung um die Rasternormale bestimmt:

$$LC_{nBiegE} = \nabla_{0,8}^{1,6} \left(\bar{\alpha}_n \cdot \sqrt[4]{\frac{L_{boxP}}{L_{ax}}} \right) \cdot \Delta_1^4 \left(\frac{\bar{\alpha}_{lat}}{\bar{\alpha}_n} \right). \quad (5-21)$$

Für die *Chambers* ergibt sich folgende Formel für Biegung:

$$LC_{BiegC} = \begin{cases} \overline{\max(LC_{axBiegE}, LC_{nBiegE})} \cdot \nabla_{0,2}^{0,4} \left(\frac{N_{nBieg}}{N_{axBieg}} \right) \cdot \frac{N_{Bieg}}{N_E} & \text{für } N_{nBieg} < N_{axBieg}, \\ \overline{\max(LC_{axBiegE}, LC_{nBiegE})} \cdot \nabla_{0,167}^{0,667} \left(\frac{N_{axBieg}}{N_{nBieg}} \right) \cdot \frac{N_{Bieg}}{N_E} & \text{für } N_{nBieg} > N_{axBieg}. \end{cases} \quad (5-22)$$

Einerseits wird über die *Edges* der *Chamber* der Durchschnitt aus $LC_{axBiegE}$ bzw. LC_{nBiegE} gebildet, je nachdem welcher Wert bei den einzelnen *Edges* größer ist. Je größer der Biegeindex in den *Edges* ist, desto größer wird auch das Lastkriterium der *Chamber*. Andererseits wird das Verhältnisse aus sich seitlich N_{nBieg} und axial biegenden Wänden N_{axBieg} berücksichtigt, da bei der Biegung einer *Chamber* beide Arten in vergleichbaren Anzahlen vorkommen müssen. Eine *Edge* wird zu N_{nBieg} gezählt, sobald ihr $LC_{nBiegE} > 0,1$ ist und in gleicher Weise zu N_{axBieg} , wenn $LC_{axBiegE} > 0,1$ ist. Falls beide Anzahlen 0 sind, wird dies abgefangen und LC_{BiegC} mit 0 besetzt. Zuletzt wird noch die Anzahl der *Edges* N_{Bieg} , die überhaupt eine Biegung aufweisen, geteilt durch die Anzahl der *Edges* N_E der *Chamber* C als Faktor berücksichtigt. Zu N_{Bieg} werden die *Edges* gezählt, wenn $LC_{axBiegE}$ oder LC_{nBiegE} einen Wert größer als 0,1 aufweisen.

Ein lokal begrenztes Ausbeulen oder Deformieren ist dadurch charakterisiert, dass es in axialer oder lateraler Richtung zu lokal begrenzten großen Deformationen kommt, die im Folgenden über zwei Parameter erfasst und später zusammengefasst werden. Für das lokale axiale Ausbeulen $I_{axBeulE}$ wird erst das arithmetische Mittel über die lateralen Einträge der axialen Krümmungen bestimmt und dann das Maximum über die axialen Einträge und über alle Zeitpunkte ausgewählt. Außerdem soll der Medianwert der axialen Krümmungen über die axiale Laufkoordinate deutlich geringer sein, als der Maximalwert, um zu gewährleisten, dass die Deformation nur lokal stattfindet und nicht gleichmäßig über die gesamte axiale Länge. Die Formel dazu lautet:

$$I_{\text{axBeulE}} = \nabla_{0,3}^{0,7} \left(\max_{\text{ax},t}(\bar{c}_{\text{ax}}) \right) \cdot \Delta_{0,05}^{0,15} \left(\frac{\overline{\max}_t(\bar{c}_{\text{ax}})}{\max_{\text{ax},t}(\bar{c}_{\text{ax}})} \right). \quad (5-23)$$

Für die lokale Deformation in lateraler Richtung I_{latBeulE} , muss sich die laterale Länge einer Reihe $d_{\text{rel,latRow}}$ verkürzt haben. Gleichzeitig darf der Median der lateralen Längen über die axiale Laufvariable nicht nennenswert unter 1,0 sinken, sodass mindestens die Hälfte der *Edge* nicht stark von dieser lokalen Deformation betroffen ist und somit auch keine vollständige laterale Biegung der kompletten Wand vorliegt. Es ergibt sich folgende Formel:

$$I_{\text{latBeulE}} = \Delta_{0,85}^{0,95} \left(\min_{\text{ax},t}(d_{\text{rel,latRow}}) \right) \cdot \Delta_{0,975}^{0,95 \cdot \min_{\text{ax},t}(d_{\text{rel,latRow}}) + 0,05} \left(\frac{\min_{\text{ax},t}(d_{\text{rel,latRow}})}{\overline{\min}_t(d_{\text{rel,latRow}})} \right). \quad (5-24)$$

Über die definierten Zusammenhänge darf z. B. der Median über die axiale Länge $\overline{\min}_t(d_{\text{rel,latRow}})$ nur auf 0,964 fallen, bei einer minimalen lateralen Länge $\min_{\text{ax},t}(d_{\text{rel,latRow}})$ von 0,4, um den Index nicht zu reduzieren. Für den resultierenden Index LC_{lokBeulE} können sich die beiden Parameter verstärken:

$$LC_{\text{lokBeulE}} = \begin{cases} I_{\text{axBeulE}} + (1 - I_{\text{axBeulE}}) \cdot I_{\text{latBeulE}} & \text{für } I_{\text{axBeulE}} > I_{\text{latBeulE}} \\ I_{\text{latBeulE}} + (1 - I_{\text{latBeulE}}) \cdot I_{\text{axBeulE}} & \text{für } I_{\text{axBeulE}} \leq I_{\text{latBeulE}} \end{cases} \quad (5-25)$$

Der Wert für eine *Chamber* LC_{lokBeulC} entspricht dem Durchschnitt der Werte $\overline{LC}_{\text{lokBeulE}}$ der zugehörigen *Edges*.

Der letzte ermittelte Kennwert beschreibt die laterale Kompression von *Chambers*:

$$LC_{\text{latKompC}} = \Delta_{-0,3}^{-0,1} \left(\overline{\min}_{\text{ax}}(d_{\text{min C}}) \right) \cdot \Delta_{0,05}^{0,10} (\bar{\sigma}(d_{\text{min C}})) \cdot \nabla_{0,6}^{0,9} \left(\frac{\bar{d}_{\text{max C}}}{\max_{\text{ax}}(d_{\text{max C}})} \right). \quad (5-26)$$

Zuerst wird für jeden Zeitpunkt der kleinste Wert der minimalen lateralen Abstände in der *Chamber* $d_{\text{min C}}$ über alle axialen Positionen bestimmt und im Anschluss ein gewichtetes arithmetisches Mittel gebildet, wobei die Gewichtung des ersten Zeitpunkts abweichend 0,4 beträgt und die des letzten 1,0. Dazwischen wird linear interpoliert. Außerdem fließt auf gleiche Weise das gewichtete arithmetische Mittel der Standardabweichung der minimalen lateralen Abstände pro Zeitpunkt ein, um zu gewährleisten, dass die laterale Kompression über die gesamte *Chamber*-Länge erfolgt und nicht nur lokal. Der letzte Parameter hat einen ähnlichen Grundgedanken und entspricht dem gleichen arithmetischen Mittel über die Zeit, nun jedoch für die Verhältnisse aus den durchschnittlichen maximalen lateralen Längen über die axiale Laufvariable und der größten maximalen lateralen Länge über die axiale Laufvariable. Dies schließt aus, dass die *Chamber* nur lokal breiter wird nach der lokalen Kompression.

In **Abbildung 5-7** sind die von 0 verschiedenen Kennwerte für ein Profil angegeben, dass durch das lokale Eindringen eines Körpers eine Biegung sowie eine lokale Deformation erfährt. Die beiden seitlichen *Edges* weisen eine Biegung um die Rasternormale auf und die obere und untere *Edge* eine axiale Biegung. Als Resultat wird auch für die *Chamber* eine

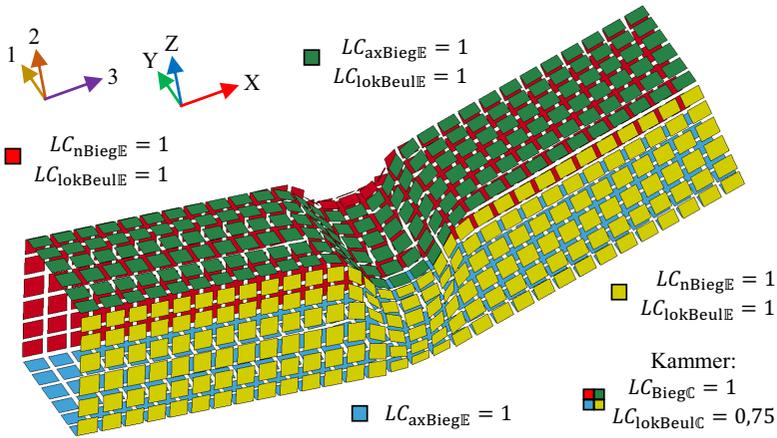


Abbildung 5-7: Belastungskennwerte für die farblich unterschiedenen *Edges* und die *Chamber* eines Profils, dass durch ein Eindringen eines Körpers eine Biegung und lokale Deformationen erfährt, mit der Visualisierung des Rasters des Profils zum letzten Zeitpunkt der Simulation

Biegedeformation detektiert. Zusätzlich schlägt das Kriterium für lokales Beulen/ Deformation bei den Rastern von drei *Edges* voll aus und somit auch bei der *Chamber* mit einem Durchschnittswert von 0,75. Nur die untere *Edge* hat keine lokale Deformation erfahren. Als weiteres Beispiel zeigt **Abbildung 5-8** (links) ein Profil, das in axialer Richtung zusammengedrückt wird. An einem Ende sind alle Freiheitsgrade gesperrt und an dem anderen Ende

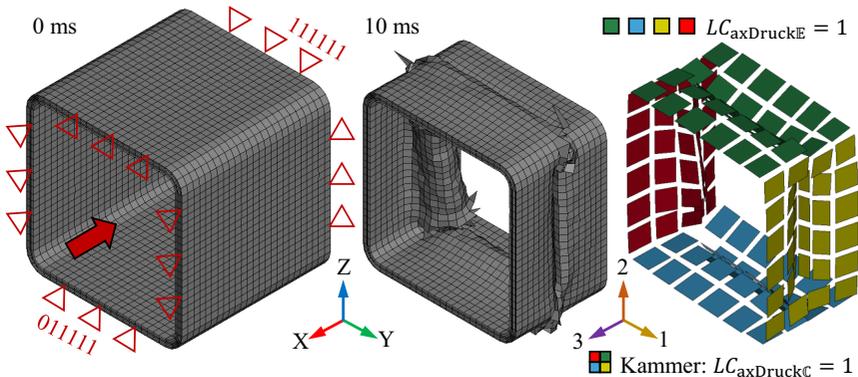


Abbildung 5-8: Simulationsmodell eines Profils, das in Richtung der Profilachse zusammengedrückt wird, zum initialen (links) und finalen Zeitpunkt (Mitte), sowie die zugehörige Visualisierung des Rasters mit den Lastkriterien, die für alle *Edges* und die *Chamber* lediglich für den axialen Druck den Wert 1 annehmen

ist nur die Verschiebung entlang der Profillachse freigegeben, damit für diese eine vorgegebene Deformation über die Zeit aufgebracht werden kann. In **Abbildung 5-8** (Mitte) ist das Profil im deformierten Zustand gezeigt und in **Abbildung 5-8** (rechts) die deformierte Visualisierung des Rasters mit den vorliegenden, von Null verschiedenen, Lastkriterien. Für die *Edges* und die *Chamber* nimmt nur das Lastkriterium für den axialen Druck den Wert 1 an, alle anderen Lastkriterien haben den Wert 0.

Zuletzt wird in **Abbildung 5-9** analog ein lateral zusammengedrücktes Profil vorgestellt, das von einem Fallgewicht getroffen wird und auf zwei Blöcken lagert. In dem Beispiel nimmt als einziges das Lastkriterium für die laterale Kompression LC_{latKompC} der *Chamber* einen Wert von 1 an und die anderen Kriterien haben alle einen Wert von 0.

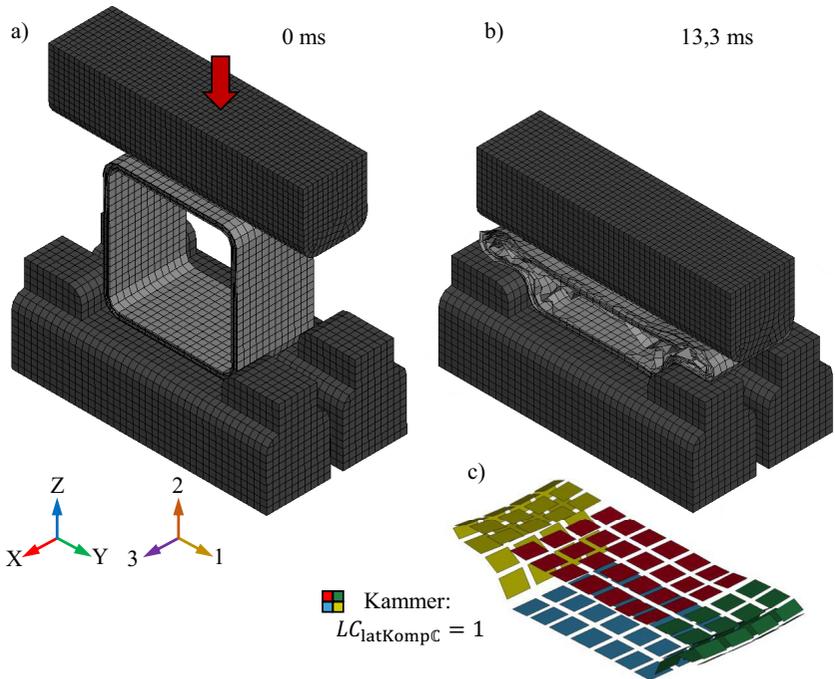


Abbildung 5-9: Lateral zusammengedrücktes Profil zum initialen Zeitpunkt (a) und letzten Zeitpunkt (b), mit der zugehörigen Rastervisualisierung und dem einzigen von Null verschiedenen Lastkriterium für laterale Kompression der *Chamber* (c)

5.1.4 Einlesen von Elementkennwerten

Neben den Informationen zum Deformationsverhalten aus den Knoten-Kennwerten, sind auch Elementinformationen interessante Kriterien für die Heuristiken. Besonders die innere Energiedichte wird in vielen Methoden analysiert, um Bereiche der Struktur zu identifizieren, die viel Energie aufnehmen und somit in dem Lastfall wichtig erscheinen (Huang et al. 2007; Patel et al. 2009; Hunkeler et al. 2013). Die innere Energiedichte ist in den binären d3plot-Dateien für jedes Element zu jedem Zeitpunkt extrahierbar und wird den Heuristiken in mehrdimensionalen Arrays pro Komponente, Element und Zeitpunkt zur Verfügung gestellt. Da sich die Energiedichte in der Binärdatei auf das Volumen bezieht, werden die eingeladenen Werte intern noch mit den Materialdichten dividiert, um die Energiedichte in Bezug auf die Masse und nicht das Volumen zur Verfügung stellen zu können. Dies bietet besonders bei dem gleichzeitigen Einsatz von Materialien mit verschiedenen Dichten innerhalb einer Struktur eine höhere Aussagekraft. Die Informationen können von den Heuristiken genutzt werden, um z. B. Bereiche in der Struktur mit einer hohen Energieabsorption zu identifizieren.

Wenn detailliertere Werte für jeden Integrationspunkt über die Dicke, bzw. für jede Lage \mathbb{L} benötigt werden, können diese Informationen nicht direkt aus den Binärdaten extrahiert werden, da sie nicht darin gespeichert werden. Um eine Aussage über die Energieaufnahme treffen zu können, wird die innere Energie $U_{\mathbb{L},t}$ eines Integrationspunktes \mathbb{L} über die Dicke für jeden Zeitpunkt t für jedes Finite Element el mit folgender Formel angenähert, die vergleichbar auch von dem Solver LS-DYNA² verwendet wird:

$$U_{\mathbb{L},el,t} = U_{\mathbb{L},el,t-1} + \sum_{i \in I} \frac{\sigma_{\mathbb{L},el,t,i} + \sigma_{\mathbb{L},el,t-1,i}}{2} \cdot (\varepsilon_{\mathbb{L},el,t,i} - \varepsilon_{\mathbb{L},el,t-1,i}) \cdot V_{el,\mathbb{L}} \quad \text{für } t > 1. \quad (5-27)$$

Hierbei wird die innere Energie des vorherigen Zeitpunkts $U_{\mathbb{L},t-1}$ verwendet und mit einer Summe addiert, die als Summationsvariable i über die verschiedenen Komponenten der Spannung bzw. Dehnung $I = \{x, y, z, xy, yz, zx\}$ läuft. Die Summanden entsprechen jeweils der gemittelten Spannungskomponente von $\sigma_{\mathbb{L},t,i}$ zum Zeitpunkt t sowie $\sigma_{\mathbb{L},t-1,i}$ zum vorherigen Zeitpunkt multipliziert mit dem Inkrement der Dehnungskomponente $\varepsilon_{\mathbb{L},t,i} - \varepsilon_{\mathbb{L},t-1,i}$ zum vorherigen Zeitpunkt und dem Volumen der Lage $V_{\mathbb{L}}$ in dem Element.

Die Normalspannungen $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ und die Schubspannungen $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ für jeden Integrationspunkt über die Dicke können direkt aus der Binärdatei für die darin enthaltenen Zeitpunkte eingeladen werden. Standardmäßig werden die Spannungen nur von der Mittel-, Innen- und Außenfläche ausgegeben. Durch die automatische Anpassung des Parameters MAXINT in dem Keyword *DATABASE_EXTENT_BINARY mit der maximalen Anzahl an Integrationspunkten über die Dicke, die in dem FE-Modell für ein Element vorkommt, wird jedoch gewährleistet, dass die Spannungen zu allen Integrationspunkten herausgeschrieben werden.

² <https://www.dynasupport.com/howtos/general/internal-energy> (zuletzt geprüft am 19.03.2022)

Die Dehnungen $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}$ und ε_{zx} werden standardmäßig nicht in die Binärdatei herausgeschrieben. Durch die automatische Anpassung des Parameters `STRFLG = 1` in dem Keyword `*DATABASE_EXTENT_BINARY` können jedoch zumindest die Dehnungen des innersten und äußersten Integrationspunktes angefordert werden. Um die Dehnungen der einzelnen Lagen und somit Integrationspunkte über die Dicke zu allen Zeitpunkten zu bestimmen, wird die Dehnung dazwischen für jede Dehnungskomponente linear interpoliert. Eine genauere Interpolation des nichtlinearen Dehnungsverlaufs über die Dicke ist mit nur zwei Datenpunkten nicht möglich. Für die Interpolation der Dehnungskomponente eines Integrationspunktes ε_L wird die Dehnung des innersten und äußersten Integrationspunktes ε_{inner} und ε_{outer} sowie die zugehörigen Abstände p der Integrationspunkte von der Elementinnenfläche verwendet:

$$\varepsilon_L = \varepsilon_{inner} + (\varepsilon_{outer} - \varepsilon_{inner}) \cdot \frac{p_L - p_{inner}}{p_{outer} - p_{inner}} . \quad (5-28)$$

Die mit Formel (5-27) angenäherten Energien U_t können geringfügig von den durch den Solver berechneten Energien abweichen, da in der Binärdatei nur ein Bruchteil der tatsächlich berechneten Zeitpunkte herausgeschrieben wird, beispielhaft ca. 100 von 50000 Zeitpunkten. Die Spannungen und Dehnungsänderungen werden so nur in bestimmten Momentaufnahmen erfasst, führen aber dennoch zu vergleichbaren Energieniveaus. Auch die lineare Dehnungsinterpolation kann einen nichtlinearen Dehnungsverlauf nicht genau abbilden. Falls nötig könnte die Anzahl der herausgeschriebenen Zeitpunkte erhöht werden und die Dehnungen der Integrationspunkte unter Umständen in der ASCII-Datei `eloutdet` angefordert werden. Bei einer großen Elementanzahl kann solch eine Datei jedoch schnell einen enormen Speicherbedarf erfordern, besonders wenn hunderte oder sogar tausende FE-Simulationen innerhalb der Optimierung berechnet werden.

5.2 Heuristiken zur Änderung der Topologie

Die Topologieheuristiken ändern den Querschnitt der betrachteten Profile durch das Hinzufügen oder Entfernen von Wänden bzw. *Edges*, basierend auf dem analysierten Deformationsverhalten. Die *Heuristiken Entfernen unbelasteter Wände, Abstützen sich schnell deformierender Wände, Ausgleichen der Energiedichte und Ausnutzen des Deformationsraums Zug/ Druck* wurden bereits für die Optimierung von Strangpressprofilen in Crashanwendungen entwickelt und erfolgreich eingesetzt (Ortmann und Schumacher 2013; Ortmann 2015; Ortmann et al. 2021). Die Heuristiken können jedoch auch für die Optimierung von FKV-Profilen eingesetzt werden, da auch hier ein ungünstiges Deformations- bzw. Energieabsorptionsverhalten vermieden werden soll. Die Wirkprinzipien der Heuristiken sind in **Abbildung 5-10** für die einzelnen Heuristiken skizziert. Darin finden sich auch die Heuristiken *Teilen*

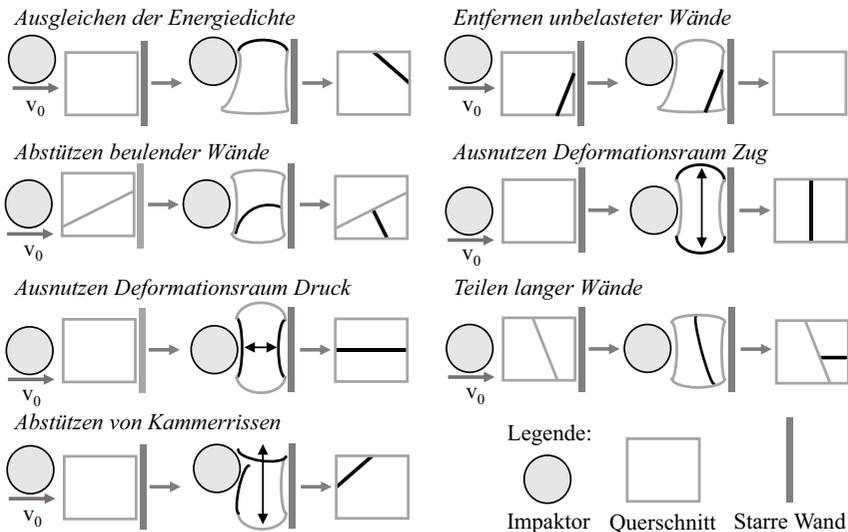


Abbildung 5-10: Skizze zur Arbeit der Topologieheuristiken, jeweils mit einem Lastfall in der Seitenansicht, der daraus resultierenden Deformation, sowie der vorgeschlagenen Querschnittsänderung durch die angegebene Heuristik

langer Wände und *Abstützen von Kammerrissen*. Durch den Einzug der *Chambers* als zusätzliches Graphenelement und des Rasters als Grundlage für die Simulationsauswertung, wird das Vorgehen innerhalb der Heuristiken nun dafür angepasst. So werden Verschiebungen direkt aus dem Raster abgefragt und Nachbarbeziehungen müssen nicht erst bestimmt werden. Der Grundgedanke der Heuristiken bleibt dadurch aber unberührt. Was alle Heuristiken gemein haben ist, dass diese nur Vorschläge generieren, die die Fertigungsrestriktionen erfüllen, da diese die Entwürfe intern prüfen und wenn nötig verwerfen. Falls eine der möglichen Symmetrien für die Struktur definiert ist, werden die durch die Heuristiken vorgeschlagenen Änderungen von den Heuristiken direkt symmetrisch ausgeführt. Bei der Verwendung von *Chambers* führt das Hinzufügen einer neuen *Edge* in den *Graphen* dazu, dass eine *Chamber* in zwei *Chambers* aufgeteilt werden muss. **Abbildung 5-11** zeigt diesen Prozess, in dem die *Chamber* mit der ID 2 geteilt wird, wenn eine neue *Edge* mittig zwischen den markierten *Edges* 4 und 2 eingeführt wird. Beide *Chambers* bekommen hierbei den gleichen Lagenaufbau der ursprünglichen *Chamber* zugewiesen. Falls eine *Edge* aus dem *Graphen* entfernt wird, müssen die beiden an der *Edge* angrenzenden *Chambers* vereinigt werden und der Prozess somit umgekehrt durchlaufen werden. Dies ist nicht in allen Fällen möglich, da die Vereinigung zu nicht konvexen *Chambers* führen kann, die nicht wickelbar sind. In solchen Fäl-

len verwerfen die internen Fertigungsrestriktionen den Vorschlag. Falls es geometrisch möglich ist, bekommt die neue *Chamber* den Lagenaufbau der ersten übergebenen *Chamber* zugewiesen. Eingeführt wird außerdem, dass neu einzuziehende *Edges* den Verlauf von existierenden *Edges* kreuzen können. In dem Fall wird die zu kreuzende *Edge* und möglicherweise angrenzende *Chambers* in jeweils zwei Elemente aufgeteilt. Die ist in dem zweiten Schritt von **Abbildung 5-11** nachzuvollziehen, in dem die angestrebte mittige Verbindung zwischen der markierten *Edge* 3 und *Edge* 1 die *Edge* 7 schneidet, sodass auch letztere in zwei *Edges* aufgeteilt wird um die angestrebte Verbindung zu ermöglichen.

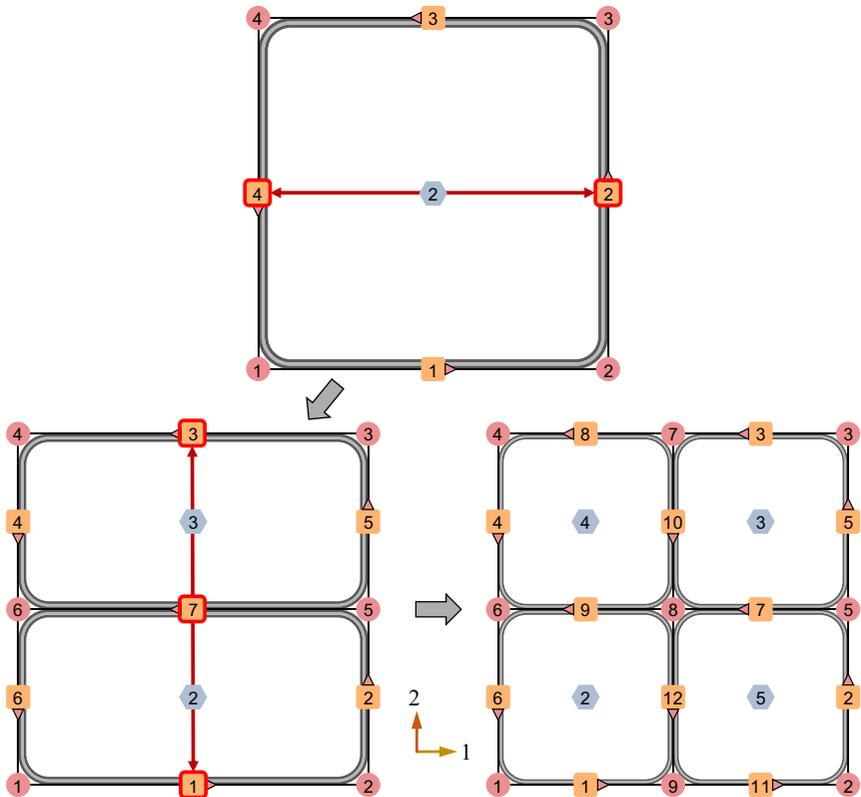


Abbildung 5-11: Schema zur Änderung der Topologie mit *Chambers*, bei der im ersten Schritt eine neue *Edge* mittig zwischen der *Edge* 4 und 2 eingefügt wird und in einem zweiten Schritt mittig zwischen *Edge* 3 und 1, bei der die auf dem Verbindungsweg liegende *Edge* 7 automatisch in zwei *Edges* geteilt wird

5.2.1 Ausgleichen der Energiedichte

Die Heuristik *Ausgleichen der Energiedichte* (*Balance Energy Density, BE*) hat das Ziel, dass die Strukturen während der Belastung eine homogene Verteilung der Energiedichten aufweisen (Ortmann 2015). Bereiche bzw. *Edges* mit einer hohen inneren Energie U werden darum mittig mit Bereichen mit einer niedrigen inneren Energie auf kurzem Wege verbunden, um auch dort eine Energieaufnahme einzuleiten. Die Energie einer *Edge* kann bei der Arbeit mit *Chambers* und mehreren Lagen nicht mehr als einzelner Wert aus den Ergebnisdateien extrahiert werden, da nun nur die Elemente in einem bestimmten Bereich der *Chambers* mit der *Edge* assoziiert werden. Darum ist es nötig, die Energien eines jeden Elements aus den Binärdaten zu importieren und für die Bewertungen zu nutzen. Um die Energiedichten beurteilen zu können, wird die durchschnittliche maximale Energiedichte $u_{l,E}$ pro *Edge* E und Lastfall l herangezogen:

$$u_{l,E} = \frac{\sum_{el \in El} \frac{\max(U_{l,el,t})}{m_{el}}}{|EL|} . \quad (5-29)$$

Hierbei wird jeweils die über die Zeit t maximale innere Energie verwendet und damit der Durchschnitt über alle assoziierten Elemente EL der *Edge* gebildet. Auf die Simulationsdaten der *Chambers* wird somit nur indirekt über die Assoziation der Daten mit den *Edges* eingegangen (siehe **Abbildung 5-3**). Dieses Vorgehen ist möglich, da im aktuellen Ablauf die Simulationsdaten aller Finiten Elemente eingeladen werden können. Im Gegensatz zu der Arbeit von Ortmann (2015) wird die Energiedichte durch die Division mit der Masse der Elemente m_{el} und nicht dem Volumen gebildet, da in der jetzigen Version jeder *Edge* und *Chamber* und sogar jeder Lage ein anderes Material zugewiesen werden kann und die möglichen Dichteunterschiede damit berücksichtigt werden. Als nächstes wird der Wert mit der maximalen durchschnittlichen Energiedichte \bar{u}_l aller Lastfälle L normiert oder mit der durchschnittlichen Energiedichte in dem jeweiligen Lastfall:

$$\hat{u}_{l,E} = \frac{u_{l,E}}{\max_{l \in L} \bar{u}_l} \quad \text{oder} \quad \hat{u}_{l,E} = \frac{u_{l,E}}{\bar{u}_l} \quad \text{mit} \quad \bar{u}_l = \frac{\sum_{E \in G} u_{l,E}}{N_E} . \quad (5-30)$$

Ersteres konzentriert sich auf den Lastfall mit den größten Energiedichten, letzteres legt den Fokus auf große Unterschiede der Energiedichten innerhalb eines Lastfalls. Das präferierte Vorgehen wird über die Konfigurationsdatei festgelegt, wobei die erste Variante als Standard festgelegt ist.

Als letztes wird pro Lastfall für alle möglichen Paarungen der *Edges* der Unterschied der Energiedichten zueinander bestimmt:

$$\Delta \hat{u}_{l, \mathbb{E}_a, \mathbb{E}_b} = \hat{u}_{l, \mathbb{E}_a} - \hat{u}_{l, \mathbb{E}_b} . \quad (5-31)$$

Die Heuristik *Ausgleichen der Energiedichte* versucht nun die *Edge*-Kombination mit dem größten Wert $\Delta \hat{u}_{l, \mathbb{E}_a, \mathbb{E}_b}$ mittig abzustützen. Falls die Fertigungsrestriktionen die Verbindung nicht erlauben, wird die *Edge*-Kombination mit dem nächstgrößten Wert ausgewählt. Dies geht so lange weiter, bis eine neue Verbindung die Fertigungsrestriktionen erfüllt. Bei der Verwendung von *Chambers* führt das Hinzufügen einer *Edge* dazu, dass eine *Chamber* in zwei *Chambers* aufgeteilt wird.

5.2.2 Entfernen unbelasteter Wände

Die Heuristik *Entfernen unbelasteter Wände* (*Delete Needless Walls, DN*) (Ortmann 2015) arbeitet ähnlich zu der Heuristik *BE*, anstatt jedoch Wände hinzuzufügen, hat sie das Ziel, Wände zu entfernen, die eine niedrige Energiedichte aufweisen und somit in vielen Fällen nicht entscheidend für das Strukturverhalten sind. Diese Annahme trifft zwar häufig zu, es können jedoch auch Fälle eintreten, wo durch das Entfernen einer Wand, obwohl sie eine niedrige Energiedichte aufweist, eine andere Wand ihre Stabilität verliert und anfängt global auszubeulen. Gerade in höheren Iterationen mit vielen Strukturelementen ist die Heuristik aber wichtig, um nicht mehr benötigte Strukturen wieder aus dem *Graphen* entfernen zu können, da durch die meisten andere Heuristiken die Anzahl der Strukturelemente nur ansteigen kann. Durch die konkurrierende Aktivierung der Heuristiken ist es nicht kritisch, falls diese oder eine andere Heuristik in einzelnen Fällen zu strukturellen Verschlechterungen führen. Die Berechnung von $\hat{u}_{l, \mathbb{E}}$ erfolgt analog zu den Formeln (5-29) und (5-30), wobei bei letzterer nur die zweite Normierungsmöglichkeit mit \bar{u}_l zur Verfügung steht, da sonst nur die Lastfälle mit großen inneren Energien Einfluss darauf hätten, welche *Edges* Löschkandidaten sind. Alle *Edges*, die in allen Lastfällen eine normierte innere Energie $\hat{u}_{l, \mathbb{E}} < 0,6$ aufweisen, sind Kandidaten für die Löschung. Außerdem dürfen die *Edges* im *Graphen* nicht die Eigenschaft `fixed` besitzen. Dieser Zusatz wird z. B. dazu verwendet, um die Löschung äußerer Wände zu verhindern, um keine offenen Profile zu erzeugen. Um auszuwählen in welcher Reihenfolge die Lösversuche unternommen werden, wird der Durchschnitt der normierten Energien der *Edge* über die Lastfälle bestimmt:

$$\hat{u}_{\mathbb{E}} = \frac{\sum_{l \in L} \hat{u}_{l, \mathbb{E}}}{|L|} . \quad (5-32)$$

Falls die Löschung einer *Edge* dazu führt, dass eine andere *Edge* an einem ihrer Enden nicht mehr mit einer anderen *Edge* verbunden ist, werden beide Wände gelöscht, wenn auch die weitere *Edge* ein Kandidat für die Löschung ist. Ist dies nicht der Fall, werden beide Wände nicht gelöscht. Das gleiche gilt auch für längere Pfade, wobei dies in der Praxis so gut wie nie vorkommt. Bei vorliegenden Symmetrien, wird die Löschung symmetrisch ausgeführt. Bei

der Verwendung von *Chambers* müssen die angrenzenden *Chambers* nach der Löschung einer *Edge* zusammengeführt werden.

5.2.3 Abstützen beulender Wände

Die Heuristik *Abstützen beulender Wände* (*Support Buckling Walls, SB*) entspricht der Heuristik *Abstützen sich schnell deformierender Wände* (Ortmann 2015). Die Heuristik hat das Ziel, schnell deformierende Wände zu identifizieren, die bei Beul- und Knickphänomenen auftreten. Solch ein Verhalten ist unerwünscht, da die Deformation ungleichmäßig und relativ unkontrolliert erfolgt und somit die Integrität der Struktur gefährden kann. Außerdem findet die plastische Deformation in solchen Fällen häufig nur sehr konzentriert statt, anstatt mehrere Bereiche der Wand in die Energieabsorption einzubeziehen. Durch eine kurze, mittige Abstützung soll eine gleichmäßigere Deformation erreicht werden. Ortmann (2015) stellt fest, dass es in der Nähe von Beul-, Knick- und Faltpphänomenen zu großen Geschwindigkeitsdifferenzen der FE-Knoten kommt und diese somit für die Identifikation genutzt werden können. Anstatt auf die Information der FE-Knoten direkt zuzugreifen und nur eine Analyseebene auszuwerten, wird nun das gesamte Raster des Profils mit den dafür ermittelten Kennwerten verwendet. Dies hat nicht nur den Vorteil, dass die mehrlagigen Verbunde dadurch einfach analysiert werden können, sondern man muss sich auch keine Gedanken mehr um die Positionierung der Analyseebene machen.

Um die Beulneigung einer *Edge* bewerten zu können, wird der Beulindex $b_{E,l}$ für jeden Lastfall l und jede *Edge* E berechnet:

$$b_{E,l} = \sqrt{l_{Eax} \cdot s_E} \cdot \frac{\sum_{ax=1}^{N_{ax}} \sum_{latA=1}^{N_{lat}} \sum_{latB=latA+1}^{N_{lat}} \sum_{t=2}^{N_t} \frac{|\vec{v}_{ax,latA,t} - \vec{v}_{ax,latB,t}|^2}{|\vec{p}_{ax,lat,1} - \vec{p}_{ax,latB,1}|}}{N_{ax} \cdot (N_{lat}^2 - N_{lat}) \cdot 0,5(N_t - 1)} \quad (5-33)$$

Bei der Berechnung werden für alle axialen Laufkoordinaten des Rasters, für alle Kombinationen der lateralen Laufvariablen in dieser axialen Ebene, für jeden Zeitpunkt die Geschwindigkeitsdifferenzen der Rasterfelder aufsummiert, nachdem diese mit dem initialen Abstand der Felder normiert wurden. Um großen Geschwindigkeitsänderungen in einer kurzen Zeit eine höhere Bedeutung zu schenken, als kleinen Geschwindigkeitsänderungen über einen längeren Zeitraum, wird die Geschwindigkeitsdifferenz quadriert. Um einen Durchschnitt der normierten Geschwindigkeitsdifferenzen ermitteln zu können, wird die Summe durch die Anzahl der aufaddierten Werte geteilt. Zuletzt wird noch ein zusätzlicher Faktor mit der axialen Länge der *Edge* l_{Eax} sowie der Dicke der *Edge* s_E vorangestellt, der den Beulindex von langen und dicken *Edges* erhöht, da diese unter Umständen aufgrund ihrer Größe nur in einem lokalen Bereich Beulen können und wegen der großen Anzahl an Feldern ohne Geschwindigkeitsunterschiede dann durch die Durchschnittsberechnung weniger konkurrenzfähig wären. Falls in einem Feld zu einem bestimmten Zeitpunkt durch Elementlöschung mehr als 50 % der

Knoten gelöscht wurden oder an ein gelöscht Element grenzt, wird die Geschwindigkeitsdifferenz für dieses Feld nicht berechnet. Bei der Durchschnittsberechnung wird intern berücksichtigt, dass weniger Werte aufsummiert wurden.

Im nächsten Schritt wird der Index für jeden Lastfall mit dem Durchschnitt der Indizes in dem Lastfall normiert und dann der über alle Lastfälle maximale Wert für jede *Edge* ausgewählt:

$$\hat{b}_{E,\max} = \max_{l \in L} \frac{b_{E,l}}{\bar{b}_l} \quad \text{mit} \quad \bar{b}_l = \frac{\sum_{E \in \mathbb{E}} b_{E,l}}{N_E} . \quad (5-34)$$

Im Anschluss wird versucht die *Edge* senkrecht und mittig (bei der Position 0,5) auf dem kürzesten Weg abzustützen, indem eine Verbindung zu einer bestehenden *Edge* erzeugt wird. Falls dies fertigungsbedingt nicht möglich ist, werden noch die Positionen 0,4 und 0,6 durchgespielt. Falls auch hier keine Verbindung etabliert werden kann, wird mit der *Edge* mit dem nächstgrößten Index $\hat{b}_{E,\max}$ fortgefahren.

5.2.4 Ausnutzen des Deformationsraums Zug/ Druck

Die Heuristik *Ausnutzen des Deformationsraums Zug/ Druck* (*Use Deformation Space Tension/ Compression, UT/ UC*) (Ortmann 2015) erkennt Bereiche im Querschnitt des Profils, die sich aufeinander zubewegen (Druck) und voneinander wegbewegen (Zug). Durch die Verbindung dieser Bereiche mit einer neuen *Edge*, soll diese zur Energieabsorption beitragen oder die Steifigkeit der Struktur erhöhen. Auch hier wird nun das Raster anstatt der Analyseebenen verwendet, um die Deformationsräume entlang der gesamten Länge des Profils auswerten zu können. Für den Zug-Modus wird im ersten Schritt für jeden Lastfall und jede axiale Laufvariable, für alle Kombinationen der *Edges* und deren laterale Laufkoordinaten, der über die Zeit maximale relative Abstand bestimmt:

$$\hat{d}_{\text{Zug},l,ax,E_A,E_B,latA,latB} = \max_{t \in \{1,N_t\}} \frac{|\vec{p}_{E_A,ax,latA,t} - \vec{p}_{E_B,ax,latB,t}|}{|\vec{p}_{E_A,ax,lat,1} - \vec{p}_{E_B,ax,latB,1}|} \quad \text{mit} \quad E_A \neq E_B . \quad (5-35)$$

Im zweiten Schritt kann bereits der größte relative Abstand ausgewählt werden und zwischen den beiden betroffenen *Edges* an den ermittelten Positionen eine neue *Edge* eingezogen werden. Die Position wird mit einer internen Methode falls nötig so angepasst, dass die minimal geforderten *Edge*-Abstände eingehalten werden. Falls die Verbindung nicht möglich ist, wird mit dem nächstgrößeren relativen Abstand fortgefahren. Im Zug-Modus muss der Wert $\hat{d}_{\text{Zug},l,ax,E_A,E_B,latA,latB}$ größer als 1,1 sein, um für eine Verbindung in Betracht zu kommen. Auf gleiche Weise wird im Druck-Modus der über die Zeit minimale relative Abstand bestimmt:

$$\hat{d}_{\text{Druck},l,ax,\mathbb{E}_A,\mathbb{E}_B,latA,latB} = \min_{t \in \{1,N,t\}} \frac{|\vec{p}_{\mathbb{E}_A,ax,latA,t} - \vec{p}_{\mathbb{E}_B,ax,latB,t}|}{|\vec{p}_{\mathbb{E}_A,ax,lat,1} - \vec{p}_{\mathbb{E}_B,ax,latB,1}|} \quad \text{mit } \mathbb{E}_A \neq \mathbb{E}_B. \quad (5-36)$$

Danach kann bereits der kleinste relative Abstand ausgewählt werden und eine neue *Edge* zwischen den beiden ermittelten und ggf. korrigierten Positionen eingezeichnet werden. Auch im Druckmodus gibt es jedoch eine Bedingung, dass der Wert $\hat{d}_{\text{Druck},l,ax,\mathbb{E}_A,\mathbb{E}_B,latA,latB}$ kleiner als 0,9 sein muss, um für eine Verbindung in Betracht zu kommen.

In (Ortmann 2015) wird durch die Verwendung eines zusätzlichen Exponenten bei der relativen Distanzberechnung verhindert, dass zu nah beieinander liegende Positionen ein zu hohes Gewicht erhalten. Auf diesen Exponenten wird verzichtet, da intern bei benachbarten *Edges* nur Kombinationen geprüft werden, die nach einer Verbindung die minimale *Edge*-Länge gewährleisten. Dadurch kommen keine Kombinationen mit sehr geringen Abständen mehr vor, deren Gewichtung reduziert werden müsste.

Durch die Arbeit mit dem Raster und die effiziente Datenverwaltung in Arrays, kann die Heuristik die mehreren Millionen relativen Distanzen für die zahlreichen Kombinationen in wenigen Sekunden berechnen und die vielversprechendste Verbindung realisieren. Ein Vorgehen ohne das Raster und die direkte Arbeit mit den FE-Knoten, ist bei der Auswertung des gesamten Profils weniger praktikabel, da dann bis zu einer Milliarde Distanzen berechnet und verarbeitet werden müssten und jede einzelne Berechnung länger dauert, wenn die Daten nicht aus den effizienten Arrays abgefragt werden.

5.2.5 Teilen langer Wände

Die Heuristik *Teilen langer Wände* (*Split Long Walls, SL*) wurde ursprünglich entwickelt, um große Kammern innerhalb eines Querschnitts in zwei kleinere, verschieden große Kammern aufzuteilen, um beim axialen Falten Beulen einen gleichmäßigeren Verformungswiderstand zu erreichen. Durch die verschiedenen Kammergrößen und somit *Edge*-Längen, weisen diese unterschiedliche Beulformen auf. So wird vermieden, dass alle *Edges* gleichzeitig ausbeulen und Peaks im Kraftverlauf entstehen. Auch wenn bei lateral belasteten Profilen kein axiales Faltenbeulen auftritt, hat sich der Einsatz der Heuristik auch in diesen Situationen bewährt (Beyer et al. 2021), da der erzeugte unregelmäßige Querschnitt in vielen Situationen eine Abfolge von verschiedenen Deformationen fördert.

SL greift als einzige Heuristik auf keine Simulationsdaten zurück, sondern analysiert nur die lateralen Längen der *Edges*. Es wird standardmäßig versucht die längste *Edge* bei einer Position von 0,4 oder 0,6 mit der zweitlängsten *Edge* bei einer Position von 0,4 oder 0,6 zu verbinden, je nachdem wo die kürzeste Verbindung entsteht. Ist diese Verbindung nicht möglich, wird versucht die längste *Edge* mit der nächst kleineren *Edge* zu verbinden, bis der Vorgang erfolgreich ist. Die angestrebten Positionen können in der Konfigurationsdatei variiert werden.

5.2.6 Abstützen von Kammerrissen

Bisher hat sich in der GHT nur die Heuristik *Abstützen Versagender Wände* (Ortmann et al. 2021) mit Versagen auseinander gesetzt. In der Heuristik werden Bereiche, in denen in kurzer Zeit viel Versagen stattfindet, durch eine neue eingebrachte Wand direkt an der versagenden Stelle verstärkt. Die Heuristik *Abstützen von Kammerrissen* (*Support Chamber Crack, SC*) setzt sich stattdessen mit dem Versagen von *Chambers* auseinander. Die Heuristik detektiert, wenn in einer axialen Reihe des Rasters verstärkt Elementlöschung stattgefunden hat. Solch ein Versagen entlang des gesamten Profils ist unerwünscht, da die *Chamber* bei einer lateralen Druckbelastung dann ihre strukturelle Integrität verlieren kann und einfach zusammenklappt, ohne viel Energie dabei zu absorbieren. Gerade bei der Arbeit mit FKV ist es wichtig, solche Fälle zu vermeiden, weswegen eine Abstützung um diesen Bereich erfolgt. Hierbei wird keine neue direkte Verbindung zu dem versagenden Bereich angestrebt, sondern eine Abstützung im Umfeld des Risses, da ein Versagen bei FKV zum Energieabsorptionsmechanismus gehört und somit nicht komplett verhindert werden kann. Die Abstützung soll nach einem möglichen Riss in axialer Richtung die strukturelle Integrität erhöhen und die Energieabsorption dadurch steigern. Um die relevanten Positionen zu bestimmen, wird zuerst für alle *Edges* und alle lateralen Laufkoordinaten der durchschnittliche Anteil der zum Ende der Simulationszeit t_{max} noch nicht gelöschten FE-Knoten $\bar{\beta}_{E,lat}$ über die Lastfälle und die axiale Laufvariable bestimmt:

$$\bar{\beta}_{E,lat} = \frac{\sum_{l \in L} \sum_{ax=1}^{N_{ax}} \beta_{l,E,ax,lat,t_{max}}}{|L| \cdot N_{ax}} . \quad (5-37)$$

Bei der Berechnung des Anteils der noch vorhandenen Knoten $\beta_{l,E,ax,lat,t_{max}}$ gilt ein Knoten als nicht mehr vorhanden, wenn er selbst gelöscht wurde oder an ein gelöschtes Element grenzt hat. Um für die Auswertung in Frage zu kommen, müssen die betrachteten Positionen einen Wert $\bar{\beta}_{E,lat} < 0,8$ aufweisen.

Nun muss noch für jede Position bestimmt werden, welche der beiden angrenzenden *Chambers* abgestützt wird. Dazu wird bei jeder Position geprüft, zu welcher *Chamber* der größere Anteil der gelöschten Knoten gehört.

Danach kann die Position mit dem niedrigsten Wert $\bar{\beta}_{E,lat}$ ausgewählt werden und ein Versuch unternommen werden, den Bereich abzustützen. Dazu wird in der ausgewählten *Chamber* um die minimale *Edge*-Länge von der Position des Risses in beide *Chamber*-Richtungen weg gewandert und versucht, eine neue *Edge* zwischen den beiden Positionen einzuziehen, um die *Chamber* damit zu teilen und den Bereich zu stützen. Die Position wird falls nötig geringfügig variiert, um Fertigungsrestriktionen einzuhalten. Falls keine *Edge* eingezogen werden kann, wird die Distanz schrittweise bis zur anderthalbfachen minimalen *Edge*-Länge erhöht. Falls überhaupt keine Verbindung realisiert werden kann, wird mit der Position des nächstgrößeren Werts $\bar{\beta}_{E,lat}$ fortgefahren. Bei der Verwendung von Symmetrien erfolgen die

Anpassungen symmetrisch. **Abbildung 5-12** zeigt das Vorgehen für eine Kammer mit einem Riss in axialer Richtung. Ausgehend von dem Riss in der Nähe von *Vertex 3* wird in beide Richtungen entlang des *Chamber*-Umfangs gewandert und das Einziehen einer neuen *Edge* zwischen diesen Positionen probiert. Erst in dem letzten Schritt erfüllt die neue *Edge* die Fertigungsrestriktionen und die *Chambers* werden aufgeteilt. Selbst wenn weiterhin an der gleichen Stelle ein Riss auftritt, erhöhen die neuen Wände die strukturelle Integrität des Profils.

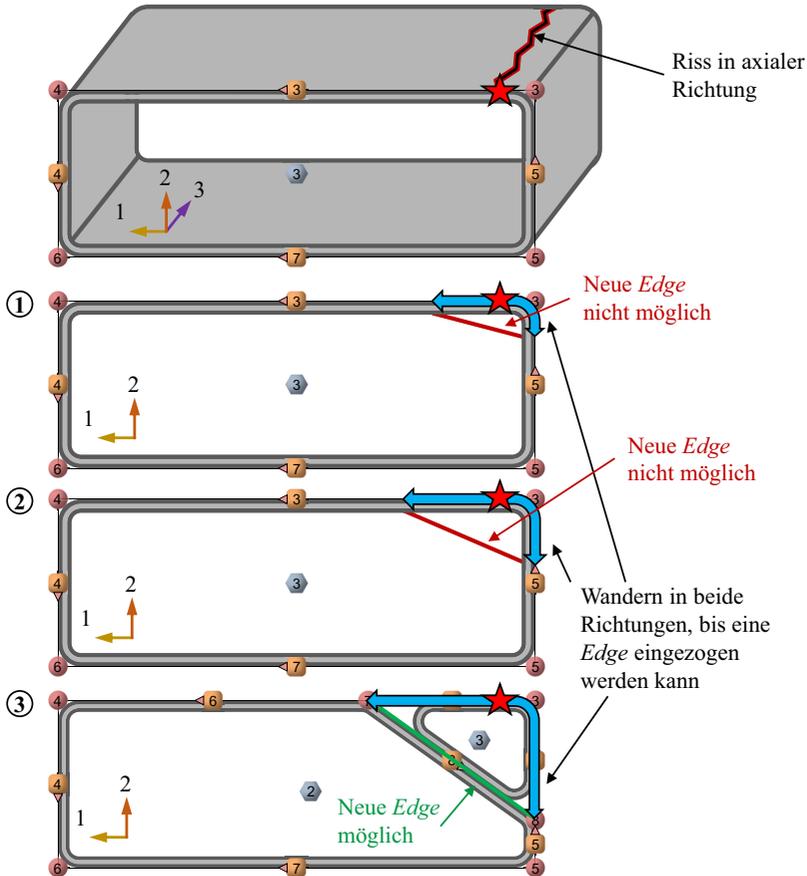


Abbildung 5-12: Profil mit einem detektierten Riss in Richtung der Profilachse, dessen Position abgestützt werden soll, indem iterativ versucht wird, in zunehmender Entfernung von dem Riss, eine neue *Edge* einzuziehen und dadurch eine neue *Chamber* zu erzeugen

5.3 Heuristiken zur Änderung des Lagenaufbaus

Die Lagenaufbauheuristiken konzentrieren sich nicht auf die Topologie, sondern passen die Dicken und die Orientierung der einzelnen Schichten des Laminats an, entfernen Schichten aus dem Lagenaufbau oder fügen Schichten hinzu. Dazu analysieren sie die Energien in den einzelnen Lagen bzw. Integrationspunkten oder verwenden die bereits bestimmten Lastkriterien.

Auch wenn die Lagenaufbauheuristiken für den Einsatz von mehrlagigen FKV-Strukturen entwickelt werden, können die energiebasierten Heuristiken auch bei anderen Anwendungen wie Metallextrusionsprofilen genutzt werden, um Masse innerhalb des Querschnitts zu verlagern und unter Umständen aufwendigere Dimensionierungen einzusparen. In **Abbildung 5-13** findet sich eine Skizze mit den Prinzipien der fünf derzeit implementierten Lagenaufbauheuristiken, die folgend im Detail vorgestellt werden.

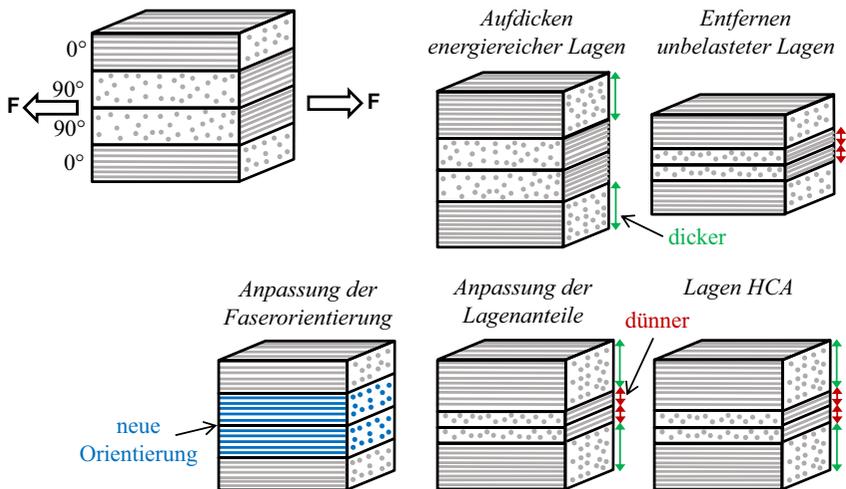


Abbildung 5-13: Skizzierte Prinzipien der Lagenaufbauheuristiken am Beispiel eines $[0^\circ;90^\circ;90^\circ;0^\circ]$ -Lagenaufbaus, bei dem die Belastung in Richtung der 0° -Lage erfolgt

5.3.1 Aufdicken energiereicherer Lagen

Die Heuristik *Aufdicken energiereicherer Lagen* (*Thicken Needed Layers, TL*) dickt die Lagen mit einer hohen spezifischen Energieabsorption auf. Zuerst wird die maximale spezifische

Energie $u_{l,\mathbb{L}}$ für jede Lage \mathbb{L} aller Graphenelemente des *Graphen* \mathbb{G} für jeden Lastfall l basierend auf den inneren Energien $U_{l,\mathbb{L},e,t}$ (siehe Formel (5-27)) der Elemente El der Lage über die Zeit t bestimmt:

$$u_{l,\mathbb{L}} = \frac{\sum_{e \in El} \max_t (U_{l,\mathbb{L},e,t})}{m_{\mathbb{L}}} . \quad (5-38)$$

Für jedes Element wird die maximale innere Energie über die Zeit ausgewählt und die ermittelten Werte über alle Elemente aufsummiert. Durch die Division mit der Masse der Lage $m_{\mathbb{L}}$, wird die spezifische Größe berechnet. Als nächstes wird die spezifische innere Energie noch mit der durchschnittlichen spezifischen inneren Energie \bar{u}_l in jedem Lastfall normiert:

$$\hat{u}_{l,\mathbb{L}} = \frac{u_{l,\mathbb{L}}}{\bar{u}_l} \quad \text{mit} \quad \bar{u}_l = \frac{\sum_{\mathbb{L} \in \mathbb{G}} u_{l,\mathbb{L}}}{|\mathbb{L} \in \mathbb{G}|} . \quad (5-39)$$

Wenn $\hat{u}_{l,\mathbb{L}}$ in allen Lastfällen einen vorgegebenen Wert c_{min} überschreitet, ist die Lage ein Kandidat für das Aufdicken. Bei der Arbeit mit mehrlagigen FKV eignet sich z. B. ein Wert von $c_{min} = 1,3$. Im Anschluss wird für jede Lage die durchschnittliche normierte spezifische Energie über alle Lastfälle L bestimmt:

$$\bar{\hat{u}}_{\mathbb{L}} = \frac{\sum_{l \in L} \hat{u}_{l,\mathbb{L}}}{|L|} . \quad (5-40)$$

Je nachdem was in der Konfigurationsdatei angegeben ist, wird entweder die Lage mit dem größten Wert $\bar{\hat{u}}_{\mathbb{L}}$ aufgedickt oder alle zuvor festgestellten Kandidaten. Die hinzugefügte Dicke entspricht 10 % der durchschnittlichen Dicke der *Chambers* und *Edges* im *Graphen*, die eine Dicke > 0 mm aufweisen. Damit herstellbare Lagendicken angestrebt werden, wird der Wert auf ein Vielfaches der, in der Konfigurationsdatei angegebenen, minimalen Lagendicke gerundet. Falls ein symmetrischer Lagenaufbau vorliegt, werden die symmetrisch liegenden Lagen ebenfalls mit angepasst. Beide Lagen erfahren dann jeweils die Hälfte der angestrebten Dickenänderung. Falls im *Graphen* ebenfalls Symmetrien definiert sind, werden die korrespondierenden Lagen der symmetrischen Graphenelemente ebenfalls mit angepasst.

5.3.2 Entfernen unbelasteter Lagen

Die Heuristik *Entfernen unbelasteter Lagen* (*Delete Needless Layer, DL*) schaut sich analog Lagen an, die eine sehr geringe Energieabsorption haben, um deren Dicke zu reduzieren oder sie zu löschen, wenn die Lage zu dünn wird. Mit den Formeln (5-38), (5-39) und (5-40) wird die durchschnittliche normierte spezifische Energie über die Lastfälle $\bar{\hat{u}}_{\mathbb{L}}$ ermittelt. Eine Lage wird ein Kandidat für die Löschung, wenn in allen Lastfällen ein Wert von 0,6 unterschritten wird. Je nach Angabe in der Konfigurationsdatei werden alle Kandidaten in ihren Dicken

reduziert oder nur die Lage mit dem geringsten Wert \bar{u}_l . Die entfernte Dicke entspricht hier ebenfalls 10 % der durchschnittlichen Dicke der *Chambers* und *Edges*, gerundet auf ein Vielfaches der minimalen Lagendicke. Bei symmetrischen Lagenaufbauten verteilt sich die reduzierte Dicke auf die beiden symmetrischen Lagen, es ist jedoch erforderlich, dass beide ein Kandidat für die Dickenreduzierung sind. Bei Symmetrien im *Graphen* müssen die Lagen der symmetrischen Graphenelemente ebenfalls Kandidaten sein, damit keine wichtigen Lagen entfernt werden. Tritt einer der Fälle nicht ein, werden diese Lagen nicht angepasst. Falls eine Lage dünner als die Hälfte der minimalen Lagendicke wird, wird diese Lage gelöscht. Falls in dem Lagenaufbau noch eine Lage mit einer Orientierung existiert, deren Betrag um maximal 5° von der gelöschten Lage abweicht, wird die Dicke der gelöschten Lage der noch existierenden Lage hinzugerechnet. Falls der Sonderfall eintritt, dass der Lagenaufbau einer *Chamber* in dem Prozess auf eine Dicke von 0 mm reduziert wird, wird die *Chamber* mit einer benachbarten *Chamber* vereinigt und der Lagenaufbau der benachbarten *Chamber* übernommen. In dem Prozess wird die *Edge* aus dem *Graphen* gelöscht, an die beide *Chambers* begrenzt haben. Falls dies fertigungsbedingt nicht möglich ist, weil z. B. eine nicht konvexe *Chamber* entstehen würde, wird der Vorschlag durch die Heuristik verworfen.

5.3.3 Anpassung der Lagenanteile

Die Heuristik *Anpassung der Lagenanteile* (*Fit Fractions, FR*) kombiniert die Grundideen der Heuristiken *Aufdicken energiereicher Lagen* und *Entfernen unbelasteter Lagen*, indem für jeden Lagenaufbau der Graphenelemente eine Lage bestimmt wird, die aufgedickt wird und eine Lage, deren Dicke reduziert wird, ohne die Gesamtdicke des Lagenaufbaus zu ändern. Es werden somit nur Anteile innerhalb eines Lagenaufbaus verändert.

Zuerst wird mit Formel (5-38) die maximale spezifische Energie $u_{l,\mathbb{L}}$ für jede Lage \mathbb{L} in jedem Lastfall l bestimmt. Im Anschluss werden die Werte mit der durchschnittlichen spezifischen Energie des Lagenaufbaus S in dem jeweiligen Lastfall normiert. Bei der Berechnung des Durchschnitts werden die Anteile der Lagen $fr_{\mathbb{L}}$ am Lagenaufbau berücksichtigt sowie die durchschnittliche Dichte des Lagenaufbaus ρ_S und der Lage $\rho_{\mathbb{L}}$.

$$\hat{u}_{l,\mathbb{L}} = \frac{u_{l,\mathbb{L}}}{\bar{u}_{l,S}} \quad \text{mit} \quad \bar{u}_{l,S} = \frac{\sum_{\mathbb{L} \in S} (u_{l,\mathbb{L}} \cdot fr_{\mathbb{L}} \cdot \rho_{\mathbb{L}})}{\rho_S} \quad . \quad (5-41)$$

Zuletzt wird mit $\hat{u}_{l,\mathbb{L}}$ eingesetzt in (5-40) der Durchschnitt über die Lastfälle $\bar{\hat{u}}_{\mathbb{L}}$ ermittelt. Nun kann über jeden Lagenaufbau iteriert werden und jeweils die Lage mit der größten normierten spezifischen Energie $\bar{\hat{u}}_{l,g}$ und der kleinsten normierten spezifischen Energie $\bar{\hat{u}}_{l,k}$ bestimmt werden. Falls die Lage mit der kleinsten normierten spezifischen Energie $\bar{\hat{u}}_{l,k}$ in einem der Lastfälle einen Wert $\hat{u}_{l,\mathbb{L}} > 1$ aufweist, hat die Lage in mindestens diesem Lastfall eine relevante Bedeutung und wird nicht mehr als Kandidat betrachtet. Dann wird mit der Lage mit dem nächstgrößeren Wert $\bar{\hat{u}}_{\mathbb{L}}$ fortgefahren, so lange bis die Bedingung erfüllt ist oder alle

Lagen durchlaufen wurden. Es kann auch sein, dass keine Lage die Bedingung erfüllt. Je nach den Einstellungen in der Konfigurationsdatei wird nur der Lagenaufbau mit dem größten Wert $\tilde{u}_{l,g}$ einer Lage bearbeitet oder alle Lagenaufbauten, die im *Graphen* definiert sind.

Die neue Dicke der Lage mit der größeren normierten spezifischen Energie $s_{neu,l,g}$ berechnet sich mit den Anteilen der Lagen $fr_{l,g}$ und $fr_{l,k}$ am Lagenaufbau sowie den alten Dicken $s_{alt,l,g}$ und $s_{alt,l,k}$ nach folgender Formel:

$$s_{neu,l,g} = \frac{\tilde{u}_{l,g} fr_{l,g}}{\tilde{u}_{l,g} fr_{l,g} + \tilde{u}_{l,k} fr_{l,k}} \cdot (s_{alt,l,g} + s_{alt,l,k}) . \quad (5-42)$$

Die neue Dicke der Lage mit der kleinsten normierten spezifischen Energie $s_{neu,l,k}$ wird um die entsprechende Dickenänderung dünner:

$$s_{neu,l,k} = s_{alt,l,k} - (s_{neu,l,g} - s_{alt,l,g}) . \quad (5-43)$$

Die Dickenänderungen werden, wie bei den anderen bisher vorgestellten Lagenaufbauheuristiken, auf maximal 10 % der durchschnittlichen Dicke der *Chambers* und *Edges* beschränkt und auf ein Vielfaches der minimalen Lagendicke gerundet. Die erfolgten Anpassungen werden bei vorliegenden symmetrischen Lagenaufbauten und symmetrischen Lagen entsprechend übertragen.

5.3.4 Ausgleichen der Energiedichte über alle Lagen

Die Heuristik *LagenHCA* (*LayerHCA*, *LH*) macht sich den Grundgedanken der HCA-Methode zu nutzen, um gleichmäßige Energiedichten innerhalb des Lagenaufbaus anzustreben. Auch hier wird im ersten Schritt die durchschnittliche normierte spezifische Energie über die Lastfälle \tilde{u}_l mit (5-38), (5-39) und (5-40) analog ermittelt. Falls eine Lage symmetrische Lagen aufweist (im gleichen Lagenaufbau oder in symmetrischen Graphenelementen), bekommen die Lagen den Durchschnitt von \tilde{u}_l der Lagen zugewiesen, damit diese Lagen dann im Ablauf der Heuristik die gleichen Dickenänderungen erfahren. Die neue Dicke für eine Lage $s_{neu,l}$ setzt sich aus dem Produkt der alten Dicke $s_{alt,l}$ mit \tilde{u}_l zusammen. Damit die Dickenänderungen nicht größer als der erlaubte Wert Δs_{limit} werden, wird ein zusätzlicher Faktor a verwendet, der die Dickenänderungen einheitlich reduziert, falls die maximale Dickenänderung Δs_{max} im *Graphen* die erlaubte Grenze Δs_{limit} überschreitet:

$$s_{neu,l} = s_{alt,l} \cdot \left(1 + (\tilde{u}_l - 1) \cdot a\right) \quad \text{mit} \quad a = \begin{cases} 1 & \text{für } \Delta s_{max} \leq \Delta s_{limit} , \\ \frac{\Delta s_{limit}}{\Delta s_{max}} & \text{für } \Delta s_{max} > \Delta s_{limit} . \end{cases} \quad (5-44)$$

Der Wert Δs_{limit} entspricht wieder 10 % der durchschnittlichen Dicke der *Edges* und *Chambers* im gesamten *Graphen* und wird auf ein Vielfaches der minimalen Lagendicke gerundet. Die maximale Dickenänderung Δs_{max} wird zu Beginn einmalig mit folgender Formel bestimmt:

$$\Delta s_{\text{max}} = \max_{L \in G} (s_{\text{alt},L} \cdot |\bar{u}_L - 1|) . \quad (5-45)$$

Die Dicke einer Lage wird somit größer, falls $\bar{u}_L > 1$ und kleiner falls $\bar{u}_L < 1$. Die Heuristik LayerHCA hat somit die Möglichkeit Massen zwischen den *Chambers* zu verlagern und in die Bereiche des Querschnitts zu bringen, wo die größten inneren Energien vorliegen.

5.3.5 Anpassung der Faserorientierung

Die Heuristik *Anpassung der Faserorientierung (Fit Fiber Orientation, FO)* wertet nicht die Energien aus, sondern verwendet die Kriterien zur Beanspruchungssituation (siehe Abschnitt 5.1.3). Hierbei ist das Ziel die Faserorientierungen so anzupassen, dass diese zu den vorliegenden Beanspruchungen passen. Durch die Änderung der Faserorientierungen, kann die Heuristik einen sehr großen Einfluss auf das mechanische Verhalten haben. Als Orientierungen werden 0° , $\pm 45^\circ$ und 90° angestrebt (0° entspricht der Profilachse), die in drei Lagen-Gruppen zusammengefasst werden. Dadurch kann der Lagenaufbau bei der mehrschaligen Modellierung mit drei verbundenen Elementschichten repräsentiert werden und die Modellkomplexität in einem vertretbaren Rahmen bleiben. Falls nötig, können jedoch weitere Orientierungen ergänzt werden. Wie in Abschnitt 3.3.3 vorgestellt, weichen die realisierbaren Winkel durch die minimal und maximal erlaubten Orientierungen, sowie die von der Umfanglänge und Tapebreite abhängigen Winkelkorrekturen, jedoch geringfügig davon ab. In **Tabelle 5-1** ist aufgelistet, welche Orientierungen bei welcher Beanspruchung angestrebt werden.

Tabelle 5-1: Anteile der Orientierungen je nach detektierter Beanspruchung

Beanspruchung	0° -Anteil [%]	$\pm 45^\circ$ -Anteil [%]	90° -Anteil [%]
Axialer Zug	100	0	0
Axialer Druck	100	0	0
Biegung	33,3	66,6	0
Lokale Deformation/ Beulen	25	50	25
Torsion	0	100	0
Laterale Kompression	0	0	100

Grundgedanke ist hierbei, die Fasern des Verbunds in Richtung der Hauptbeanspruchungen zu orientieren. Bei Zug und Druck in axialer Richtung werden darum 0° -Lagen angestrebt, die in dieser Richtung verlaufen. Bei einer lateralen Kompression einer *Chamber* werden im

Gegensatz dazu primär Lagen in der Umfangsrichtung benötigt (90°). Bei Torsion und der daraus resultierenden Schubbelastung, wird ein ±45°-Lagenaufbau angestrebt. Bei der lokalen Deformation/ Beulen ist die Beanspruchungssituation komplex und in vielen Fällen existiert keine eindeutige Deformationsrichtung, sodass die Lagen mit den Orientierungen 0°, 45°, -45° und 90° alle einen gleichen Anteil von 25 % erhalten. Da die Anteile der ±45°-Lagen zusammen angegeben werden, ist in der Tabelle an der entsprechenden Stelle ein Wert von 50 % eingetragen. Zuletzt entstehen bei der Biegung der Profilachse einer *Chamber* auf einer Seite des Querschnitts zugbeanspruchte Bereiche und auf der anderen Seite druckbeanspruchte Bereiche, was für den Einsatz von 0°-Lagen spricht. Bei einer durch die Lastkriterien detektierten deutlichen Biegedeformation eines FKV-Profiles, liegen in der Regel jedoch auch lokale Schädigungen durch eindringende Körper vor oder ein lokales Versagen durch eine Überlast, die die deutliche Durchbiegung überhaupt erst zulassen. Hier können ±45°-Lagen helfen. Um der gesamten Situation gerecht zu werden, werden in dem Fall darum gleiche Anteile an Lagen mit 0°, 45° und -45° angestrebt. Die vorgestellten Anteile sollten je nach Material und den damit gesammelten Erfahrungen, wenn nötig, angepasst werden. Direkt zur Beanspruchungssituation passende Anteile der einzelnen Orientierungen erhöhen hierbei die Effizienz, können durch die vielen möglichen und nicht klar abgrenzbaren Deformationszustände aber oft noch von dem theoretisch optimalen Lagenaufbau abweichen. Da nach der Aktivierung der Heuristik *FO* in den folgenden Iterationen noch die anderen Lagenaufbauheuristiken für den Entwurf aktiviert werden, können die Anteile im Lagenaufbau dann noch nachjustiert werden.

Da auch Mischungen der Beanspruchungen auftreten können oder Beanspruchungen nicht deutlich ausgeprägt sein müssen, werden die finalen Anteile über Formeln ermittelt. Die Bestimmung erfolgt für jede *Chamber* einzeln, nur bei vorliegenden Symmetrien werden die Kriterien der jeweils symmetrischen *Chambers* gemeinsam ausgewertet. Der Anteil der 0° Lagen $fr_{0^\circ, C}$ einer *Chamber* berechnet sie mit den in **Tabelle 5-1** angegebenen Werten wie folgt:

$$fr_{0^\circ, C} = \frac{LC_{ZugC} + LC_{AxDruckC} + 0,33LC_{BiegC} + 0,25LC_{lokBeulC}}{LC_{ZugC} + LC_{AxDruckC} + LC_{BiegC} + LC_{lokBeulC} + LC_{TorsC} + LC_{latKompC}} \cdot \quad (5-46)$$

Der Anteil der ±45°-Lagen $fr_{45^\circ, C}$ und der 90°-Lagen $fr_{90^\circ, C}$ berechnet sich auf gleiche Weise:

$$fr_{45^\circ, C} = \frac{0,66LC_{BiegC} + 0,5LC_{lokBeulC} + LC_{TorsC}}{LC_{ZugC} + LC_{AxDruckC} + LC_{BiegC} + LC_{lokBeulC} + LC_{TorsC} + LC_{latKompC}}, \quad (5-47)$$

$$fr_{90^\circ, C} = \frac{0,25LC_{lokBeulC} + LC_{latKompC}}{LC_{ZugC} + LC_{AxDruckC} + LC_{BiegC} + LC_{lokBeulC} + LC_{TorsC} + LC_{latKompC}} \cdot \quad (5-48)$$

Für den Fall, dass kein Lastkriterium eintritt, wird allen Anteilen 33,3 % zugewiesen. Um robustere Lagenaufbauten zu erreichen, soll keiner der Anteile $< 20\%$ oder $> 60\%$ sein. Um dies zu erreichen, wird zu jedem Anteil 0,5 hinzuaddiert und die Summe durch 2,5 geteilt. Für den so korrigierten Wert $fr_{0^\circ, \mathbb{C}}^*$ und in gleicher Weise die anderen Anteile ergibt sich somit folgende Formel:

$$fr_{0^\circ, \mathbb{C}}^* = \frac{fr_{0^\circ, \mathbb{C}} + 0,5}{2,5} . \quad (5-49)$$

So führt der Extremfall mit einem Anteil $fr = 100\%$ zu einem korrigierten Anteil $fr^* = 60\%$ und die anderen beiden Anteile nehmen einen Wert von 20% an. Falls der Lagenaufbau sehr dünn ist und die ermittelte Dicke einer Orientierung (der jeweilige Anteil fr^* multipliziert mit der *Chamber*-Dicke) kleiner als die minimale Lagendicke ist, wird der Anteil dieser Orientierung auf 0% gesetzt, da sie zu dünn ist, um hergestellt zu werden. Dadurch werden die beiden verbleibenden Anteile entsprechend größer. Nach der Auswertung wird den *Chambers* der Lagenaufbau $[90^\circ, -90^\circ, 0^\circ, -0^\circ, 45^\circ, -45^\circ]$ mit den Anteilen $[0,5fr_{90^\circ, \mathbb{C}}^*, 0,5fr_{-90^\circ, \mathbb{C}}^*, 0,5fr_{0^\circ, \mathbb{C}}^*, 0,5fr_{-0^\circ, \mathbb{C}}^*, 0,5fr_{45^\circ, \mathbb{C}}^*, 0,5fr_{-45^\circ, \mathbb{C}}^*]$ zugewiesen.

Da für Wickelstrukturen minimal und maximal zulässige Winkel angegeben werden können, werden die 0° und 90° Winkel durch die zulässigen Grenzen ersetzt. Wenn mit symmetrischen Lagenaufbauten gearbeitet wird, wird der angegebene Lagenaufbau nochmal gespiegelt. Die Dicke der *Chambers* ändert sich durch die Aktivierung der Heuristik nicht und wird konstant gehalten.

5.4 Ähnlichkeitsprüfung mit den existierenden Entwürfen

Bevor die Vorschläge der Heuristiken weiterverfolgt werden, wird für jeden Entwurf geprüft, ob es innerhalb der Optimierung schon gleiche oder sehr ähnliche Designs gegeben hat, so dass dieser Entwurf nicht bewertet werden muss. Neben der Geometrie der Graphenelemente muss auch ihr Lagenaufbau bei dieser Auswertung berücksichtigt werden. Bei den Vergleichen wird eine Toleranz verwendet, die $0,1\%$ der Summe aus Länge, Höhe und Breite der umhüllenden Box des 3D-*Graphen* entspricht. Wenn nur ein Profil definiert ist, entspricht es somit ungefähr $0,1\%$ der Länge des Profils. Ein *Graph* gilt als ähnlich zu einem Vergleichsgraphen, wenn alle folgenden Bedingungen erfüllt sind:

1. Beide *Graphen* benötigen die gleiche Anzahl an *Edges*
2. Zu jeder *Edge* des *Graphen* muss in dem Vergleichsgraph eine Vergleichs-*Edge* vorliegen, deren *Vertices* sich in ihren Koordinaten maximal um die vorgegebene Toleranz von den Koordinaten der *Vertices* der *Edge* unterscheiden. Die gefundenen Paarungen werden gespeichert

3. Mit den gespeicherten *Edge*-Paarungen wird überprüft, ob in beiden *Graphen Chambers* mit den gleichen *Edge*-Abfolgen vorliegen.
4. Es wird für alle *Edge*-Paarungen und *Chamber*-Paarungen jeweils das Dickenverhältnis zu dem Vergleichselement berechnet. Diese Verhältnisse dürfen sich um maximal 10 % voneinander unterscheiden, um als gleiche Struktur betrachtet zu werden. So werden einheitliche Skalierungen der Dicken als ähnlicher *Graph* erkannt, da diese aus einer Dimensionierung hervorgehen können. Sobald es sich jedoch nicht um eine einheitliche Skalierung handelt, wird der *Graph* nicht mehr als ähnlich betrachtet.
5. Es wird für alle *Edge*-Paarungen und *Chamber*-Paarungen geprüft, ob die korrespondierenden Lagenaufbauten die gleiche Anzahl an definierten Lagen besitzen.
6. In den korrespondierenden Lagen dürfen die Orientierungen um maximal 5° oder die größtmögliche Winkeländerung, die sich bei der Korrektur der Lagenwinkel ergeben kann (vgl. Abschnitt 3.3.3), voneinander abweichen. Es wird jeweils der größere von beiden Werten verwendet.
7. Die Lagenanteile der korrespondierenden Lagen dürfen sich jeweils maximal um 10 % unterscheiden.
8. Den korrespondierenden Lagen muss das gleiche Material zugewiesen sein.

Wird die Ähnlichkeit detektiert, wird eine Information dazu in der Historie ausgegeben und der Entwurf nicht weiterverfolgt.

6 Optimierungsmethodik

6.1 Optimierungsablauf mit Aktivierung der Topologieheuristiken und Lagenaufbauheuristiken

Für den Optimierungsablauf der GHT muss ein Startdesign als *Graph*, ein FE-Modell, ein Optimierungsproblem im LS-OPT-Format und eine Konfigurationsdatei vorgegeben werden. LS-OPT ist eine Software für Optimierungen und probabilistische Analysen (Stander et al. 2019) und wird innerhalb der GHT-Optimierung aufgerufen. Die Entwurfsvariablen brauchen nicht festgelegt werden, da die GHT diese während der Optimierung automatisch ergänzt. In einem ersten Schritt (Iteration 0) erfolgt die Bewertung des Startentwurfs, indem die zugehörigen FE-Modelle erzeugt und berechnet werden. Neben einem einzelnen Funktionsaufruf wird zumeist die Möglichkeit verwendet, die Optimierung mit einer Dickendimensionierung und/oder Formoptimierung des 2D-*Graphen* mit mehreren Funktionsaufrufen zu starten. So kann bereits der Startentwurf automatisiert auf das vorliegende Optimierungsproblem angepasst werden. Ein Funktionsaufruf entspricht in dem Zusammenhang der GHT dem Ausführen einer FE-Simulation für jeden der definierten Lastfälle.

Danach folgt eine äußere Optimierungsschleife, in der die Heuristiken aktiviert werden, um neue Entwürfe zu generieren. In Iteration 1 werden die Heuristiken aus der Menge H jeweils einzeln aktiviert, sodass bis zu $|H|$ Entwürfe generiert werden, die im Anschluss mit einem einzelnen Funktionsaufruf oder einer Dimensionierung der Wandstärken bewertet werden. Wenn die Masse der Entwürfe nicht konstant sein soll, ist es empfehlenswert die Entwürfe mit einer Dimensionierung zu bewerten, da sich durch die eingebrachten oder entfernten Strukturelemente die Strukturantworten sprunghaft verändern und der Entwurf durch eine Erhöhung oder Verringerung der Wandstärken auf das Optimierungsproblem eingestellt werden sollte. Vor dem Start der Dimensionierung wird die Masse des *Graphen* durch eine Skalierung der Wandstärken auf die Masse des Entwurfs vor der Heuristikaktivierung skaliert, um unter anderem zu vermeiden, dass die Steifigkeit nach dem Hinzufügen einer Wand unmittelbar deutlich ansteigt. Nicht immer kann jede Heuristik einen Entwurf finden, sodass auch weniger als $|H|$ Entwürfe generiert werden können. Nach der Bewertung der neu generierten Designs werden die N_{ke} besten Entwürfe E der aktuellen Iteration ausgewählt und als konkurrierende Entwürfe an die nächste Iteration übergeben. Die Anzahl N_{ke} kann beliebig eingestellt werden. Je größer der Wert, desto mehr Entwürfe werden generiert und desto intensiver wird der Designraum abgetastet. Als Nachteil steigt der Simulationsaufwand näherungsweise proportional zu der Anzahl der weiter verfolgten Entwürfe, sodass sich als Kompromiss ein Wert von 5 etabliert hat.

In der nächsten Iteration werden für alle Entwürfe der Menge E die Heuristiken H separat aktiviert, sodass in der Iteration bis zu $|E| \cdot |H|$ Designs bewertet werden müssen. Der Prozess

geht so lange weiter, bis N_{iov} Iterationen ohne Verbesserungen erfolgt sind oder eine vorgegebene maximale Anzahl an Iterationen erreicht wurde. Die vorgegebene Anzahl N_{iov} wird wegen des großen Simulationsaufwands in den Iterationen oft mit eins besetzt, sodass die äußere Schleife nach der ersten Iteration ohne Verbesserung stoppt. Es ist jedoch möglich, dass die Optimierung in einer zusätzlichen Iteration noch eine Verbesserung hätte erzielen können, sodass bei weniger aufwendigen Modellen auch Werte größer eins empfohlen werden. Nachdem die äußere Schleife ihr Ende durch eins der beiden Abbruchkriterien erreicht hat, wird der bisher beste Entwurf der gesamten Optimierung ausgewählt und es kann noch eine detaillierte Dimensionierung und/oder Formoptimierung erfolgen, um durch die größeren Freiheitsgrade noch weitere Verbesserungen zu erzielen. Der Ablauf der GHT kann in **Abbildung 6-1** an einem skizzierten Beispiel nachvollzogen werden und wird in **Abbildung 6-2** mit einem Diagrammablauf genauer beschrieben. Dort wird außerdem eine Anpassung für die Arbeit mit FKV-Strukturen vorgestellt. So werden in der äußeren Optimierungsschleife erst die Topologieheuristiken aktiviert und nachdem in N_{iov} Iterationen keine Verbesserung mehr erzielt wird, die Lagenaufbauheuristiken. Es besteht zwar auch die Möglichkeit, immer alle Heuristiken zu aktivieren, die große Anzahl an Heuristiken $|H|$ führt dann jedoch zu sehr vielen Entwürfen und einen großen Simulationsaufwand. Da in den ersten Iterationen der Einfluss der Topologieänderungen jedoch größer ist als der Einfluss der Lagenaufbauänderungen, kommen hier fast ausschließlich Entwürfe der Topologieheuristiken weiter in die nächsten Iterationen. Durch die Wahl erst die Topologieheuristiken und dann die Lagenaufbauheuristiken zu aktivieren, kann durch eine geringfügig schlechtere Abtastung des Designraums die Simulationsanzahl deutlich reduziert werden.

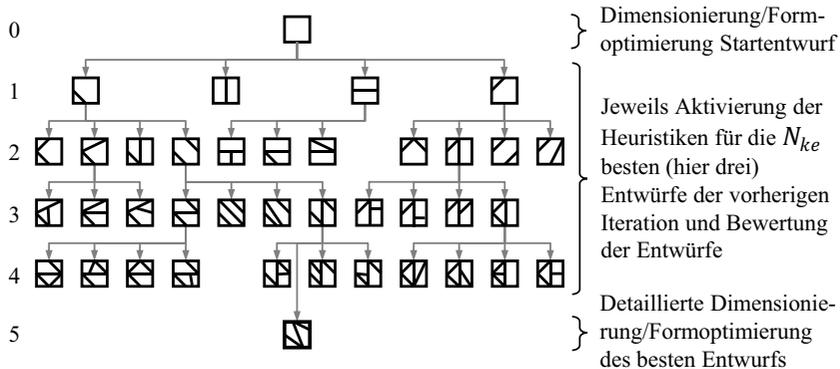


Abbildung 6-1: Ablaufskizze mit mehreren Iterationen einer GHT-Optimierung mit der Annahme von drei konkurrierenden Entwürfen und vier aktiven Heuristiken

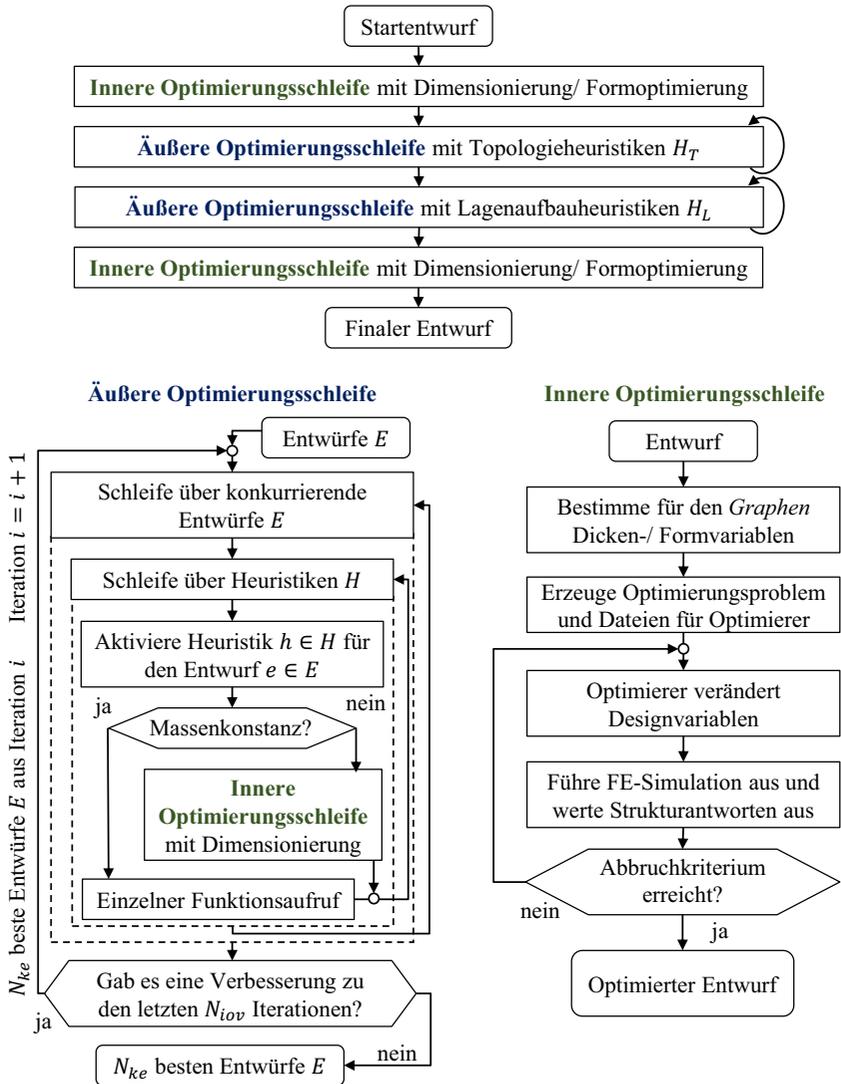


Abbildung 6-2: Ablaufdiagramm der GHT-Optimierung mit innerer und äußerer Optimierungsschleife in Anlehnung an Beyer et al. (2021)

Im Programmcode der GHT werden die Aktionen der einzelnen Iterationen in einer internen Liste festgelegt. Dies ermöglicht den Ablauf der Optimierung, wenn nötig, leicht zu modifizieren. Eine der folgenden Aktionen kann darin für jede Iteration festgelegt werden:

- Berechnung der aktuellen Designs mit einem einzelnen Funktionsaufruf
- Anwendung der Heuristiken (Topologie und/oder Lagenaufbau) für die aktuellen Designs zur Generierung neuer Entwürfe inklusive deren Bewertung (mit individuellem Funktionsaufruf oder Dimensionierung)
- Formoptimierung des aktuell besten Designs
- Dimensionierung des aktuell besten Designs
- Formoptimierung und Dimensionierung des aktuell besten Designs
- Beenden der Optimierung und Erzeugung zusätzlicher Ausgaben und Grafiken

6.2 Dimensionierung zur Bewertung der Heuristikentwürfe

In den Dimensionierungen werden die Wandstärken der *Edges* und *Chambers* variiert. Die Dimensionierungen werden zumeist ausgeführt, um neue Entwürfe der Heuristiken mit ein bis zwei Designvariablen und folglich einem möglichst geringen Ressourcenaufwand grob zu bewerten. Es stehen folgende Möglichkeiten für die Anpassung der Dicken in der Dimensionierung zu Verfügung:

- die Dicken werden nicht variiert (einzelner Funktionsaufruf)
- es gibt eine einheitliche Dicke für alle *Edges* und *Chambers*
- es gibt eine Wanddicke für äußere *Edges* und *Chambers* und eine für innere *Edges* und *Chambers*
- jede *Edge* und *Chamber* hat eine eigene Wanddicke
- es gibt einen einheitlichen Faktor, der die vorhandenen Wanddicken skaliert.

Die ersten vier Optionen wurden bereits von Ortmann (2015) für die *Edges* verwendet und nun analog auf die *Chambers* erweitert. Die Option jeder *Edge* und *Chamber* eine eigene Wanddicke zuzuweisen, kann nur in der ersten und der finalen Formoptimierung/ Dimensionierung aktiviert werden. Während der Bewertung der Heuristikentwürfe ist diese Option ausgeschlossen, da die hohe Anzahl an Variablen und die damit verbundenen Funktionsaufrufe pro Dimensionierung, während einer GHT-Optimierung schnell tausende FE-Simulationen verursachen würde.

Da es mit den Lagenaufbauheuristiken nun Regeln gibt, die gezielt die Dicken innerhalb der Struktur verändern und Massen innerhalb der Struktur verlagern, ist die Skalierungsoption nötig, um die neuen Dickenverhältnisse beizubehalten und nicht allen Strukturen die gleiche Dicke zuzuweisen. Bei der Skalierungsoption können sich dennoch Dickenverhältnisse ändern, falls ein Teil der Struktur an die zulässige Maximal- bzw. Minimaldicke kommt und dann nicht weiter angepasst werden kann.

Die Dimensionierungen an sich werden mit der Software LS-OPT (Stander et al. 2019) ausgeführt. Die GHT ergänzt unter anderem die Designvariablen in dem Optimierungsproblem und stellt die FE-Modelle bereit, die für jeden Satz an Designvariablen neu generiert werden müssen. LS-OPT übernimmt die Extraktion der Simulationsdaten und verändert die Designvariablen, wenn ein Optimierungsalgorithmus von LS-OPT ausgewählt wird. Alternativ kann innerhalb der GHT eine effiziente Dimensionierungsstrategie ausgewählt werden, die noch im Abschnitt 6.5 vorgestellt wird.

6.3 Formoptimierung zur Verbesserung einzelner Entwürfe

Die Formoptimierung arbeitet mit deutlich mehr Designvariablen. Gerade bei komplexeren Querschnitten wird ihre Anzahl schnell zweistellig. Durch die vielen Designfreiheiten kann sich ein großes Verbesserungspotential ergeben, jedoch verbunden mit einem entsprechend hohen Ressourcenbedarf und einer größeren Gefahr, dass der Optimierungsalgorithmus in schlechten lokalen Optima landet, da der Designraum nicht fein genug abgetastet werden kann. Dadurch können nur einzelne Entwürfe während der Optimierung so detailliert optimiert werden. Wie in dem Ablauf in **Abbildung 6-2** vorgestellt, werden die Formoptimierungen darum nur für den Startentwurf und den finalen Entwurf durchgeführt, wenn diese angefordert werden.

Während den Formoptimierungen kann gleichzeitig die Dimensionierung der Wandstärken erfolgen, wobei beachtet werden muss, dass die Anzahl der Designvariablen dann stark ansteigen kann. Durch die Definition von Symmetriebedingungen kann die Anzahl der Variablen reduziert werden.

In der Formoptimierung können die X- und die Y-Koordinate der *Vertices* jeweils in einem rechteckigen Raum (2D-Variable) im lokalen Koordinatensystem variiert werden. Einschränkungen ergeben sich, wenn mindestens eine der angrenzenden *Edges* fixiert ist. Dann werden die Freiheitsgrade gesperrt. Eine Ausnahme bildet der Sonderfall, dass der *Vertex* mit zwei fixierten *Edges* verbunden ist, die auf einer Geraden liegen. Tritt dieser Fall ein, darf sich der *Vertex* noch auf dieser Geraden (1D-Variable) bewegen. Um die Grenzen der Formvariablen festzulegen, wird in Anlehnung an das Vorgehen von Ortmann (2015) und Beyer et al. (2021) eine Art Kristallwachstum angewendet, in dem die Variablengrenzen wachsen, bis einer der folgenden Punkte eintritt:

- der Designraum stößt auf einen anderen 2D-Designraum
- der Designraum stößt auf einen anderen 1D-Designraum
- der Designraum verlässt den zulässigen äußeren Designraum
- der Designraum dringt in einen unzulässigen inneren Bereich ein
- der Designraum stößt auf eine der existierenden *Edges*
- der Designraum stößt auf eine Symmetrielinie

Der zulässige äußere Designraum und mehrere unzulässige innere Bereiche können in der Konfigurationsdatei als Punktpfade eingegeben werden. Ist kein zulässiger äußerer Pfad festgelegt, wird das Rechteck als Begrenzung gewählt, das den *Graphen* umschließt. In diesem Fall kann die Struktur nicht nach außen wachsen, sondern nur kleiner werden oder gleich groß bleiben.

Nachdem einer der Fälle eintritt, wird die Variable und falls möglich auch der Kollisionspartner in der jeweiligen Richtung so weit zurückgesetzt, dass die erforderlichen Mindestabstände aus den Fertigungsrestriktionen eingehalten werden. Sind Symmetriebedingungen aktiv, werden die Grenzen der Designvariablen nur für einen Teil des *Graphen* erzeugt, da die Positionen der symmetrischen *Vertices* später über abhängige Variablen gesteuert werden. Falls der zulässige Bereich einer Formvariable am Ende des Prozesses kleiner als 5 % der Graphenbreite oder -höhe ist, je nachdem welches Maß größer ist, wird die Variable gesperrt. Dieses Vorgehen reduziert die Anzahl der Designvariablen und vereinfacht somit das Optimierungsproblem, gibt jedoch einen Teil der Designfreiheiten auf. Die durch das Wachstum entstandenen 1D- und 2D-Designräume für die *Vertices* eines Extrusionsquerschnitts sind in **Abbildung 6-3** (links) skizziert.

Durch die bisherigen Maßnahmen ist noch nicht gewährleistet, dass alle Entwürfe in dem Designraum herstellbar sind. Darum werden im nächsten Schritt nacheinander alle Variablen an all ihre Grenzen gebracht und jeweils getestet, ob der Entwurf noch herstellbar ist. Im

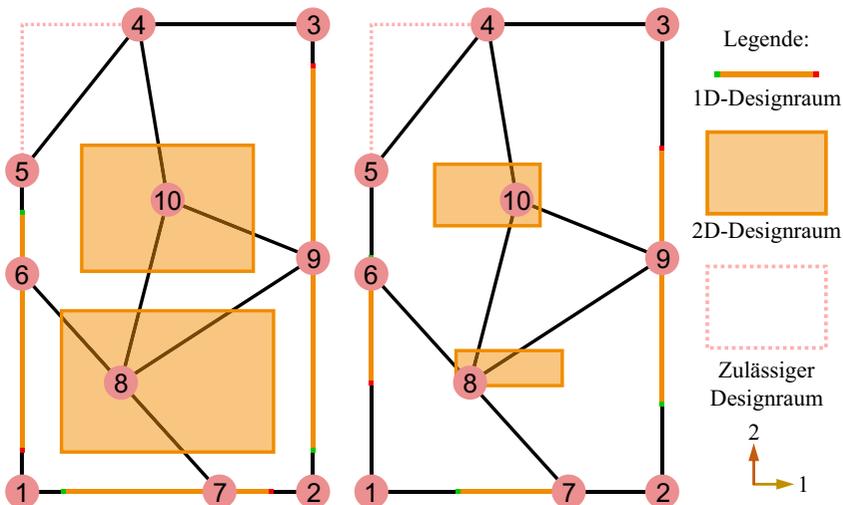


Abbildung 6-3: Zulässige Designräume nach deren Wachstum (links) und unter zusätzlicher Berücksichtigung der Fertigungsrestriktionen und minimaler Variablengrößen (rechts)

Anschluss werden noch alle Grenzkombinationen der Variablen überprüft. Tritt der Fall ein, dass bei einer Grenze oder Grenzkombination der *Graph* nicht herstellbar ist, werden die entsprechenden Grenzen iterativ so lange verkleinert, bis der *Graph* wieder herstellbar ist.

Durch die zahlreichen Kombinationsmöglichkeiten sind sehr viele Prüfungen nötig. Die interne Prüfung der Fertigungsrestriktion eines *Graphen* erfordert jedoch nur wenige Millisekunden, sodass der gesamte Prozess in wenigen Sekunden abgeschlossen ist. Durch dieses konservative Vorgehen, kann fast vollständig ausgeschlossen werden, dass der Optimierer später Designs vorschlägt, die nicht herstellbar sind, auch wenn der Designraum dadurch unter Umständen stärker eingeschränkt wird als nötig. Nach diesem Schritt wird nochmals geprüft, ob die zulässigen Bereiche der Formvariablen noch groß genug sind oder ob sie gesperrt werden können. Der final eingeschränkte Designraum für das Beispiel des Extrusionsquerschnitts ist in **Abbildung 6-3** (rechts) dargestellt.

Bei der Benutzung von *Chambers* ergeben sich weitere Einschränkungen, da vermieden werden muss, dass die *Chambers* ihre Konvexität verlieren, da sie sonst nicht mehr gewickelt werden können. Aufgezeigt wird dies an einem symmetrischen Beispielgraphen mit *Chambers* in **Abbildung 6-4**, in dem die Designräume für einen *Chamber*-Querschnitt bestimmt werden. Durch die Symmetrie werden die Formvariablen nur in der Hälfte des Querschnitts bestimmt. Wie in **Abbildung 6-4** (links) für den *Vertex* 9 hervorgehoben, gibt es zwei Arten von Begrenzungen, die die Einhaltung der Konvexität gewährleisten. Als erstes werden in allen zugehörigen *Chambers* mit mehr als 3 *Vertices* Begrenzungen zwischen den benachbarten *Vertices* eingezogen, in dem Beispiel dargestellt als rote Linie zwischen *Vertex* 12 und 5 von *Chamber* 4 und zwischen *Vertex* 6 und 5 von *Chamber* 3. Würde der *Vertex* 9 über diese

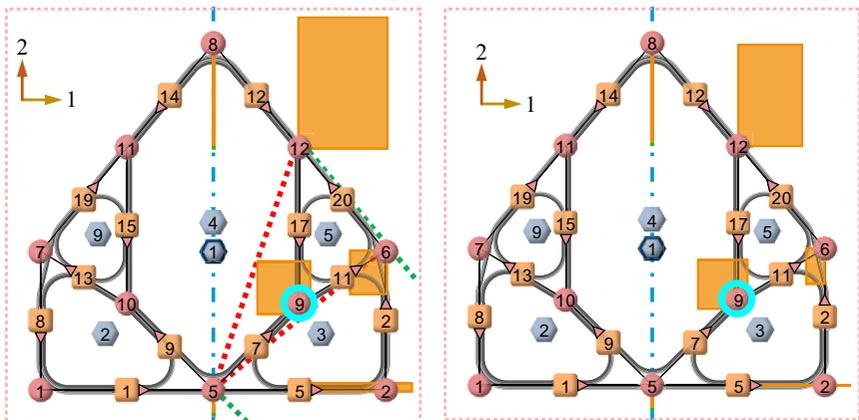


Abbildung 6-4: Veranschaulichung der Konvexitätsrestriktionen (links) und resultierender Designraum (rechts) für einen Beispielquerschnitt mit *Chambers*

Linien wandern, würde an dieser Stelle die Konvexität in einer der angrenzenden *Chambers* verloren gehen. Um das zu vermeiden, wird das Wachstum des Designraums in der jeweiligen Richtung gestoppt, wenn eine Begrenzung erreicht wird. Für die zweite Begrenzungsart werden in den angrenzenden *Chambers* mit mehr als 3 *Vertices* die Verbindungslinien zwischen dem übernächsten *Vertex*-Nachbarn und dem direkten *Vertex*-Nachbarn verlängert. In **Abbildung 6-4** (links) wurde beispielhaft die Verbindung zwischen *Vertex* 8 und 12 verlängert, sowie zwischen *Vertex* 10 und 5. Ein Überschreiten dieser grün dargestellten Linien durch den betrachteten *Vertex* 9 würde zum Verlust der Konvexität der zugehörigen *Chamber* an den benachbarten *Vertices* führen und wird darum ebenfalls unterbunden. Wie dargestellt stoppen die Begrenzungslinien das Wachstum des Designraums von *Vertex* 9 in allen Richtungen. Gerade wenn sich viele *Chambers* in einem Querschnitt befinden, sind die Designfreiheiten schnell sehr stark eingeschränkt, um in allen *Chambers* die Konvexität zu gewährleisten. Im Anschluss werden wieder alle Designvariablen an ihre Grenzen gebracht, die Fertigungsrestriktionen überprüft und die Grenzen der Formvariablen wenn nötig angepasst. Der final eingeschränkte Designraum für das Beispiel mit *Chambers* ist in **Abbildung 6-4** (rechts) dargestellt.

6.4 Optimierungsalgorithmus Sequential Response Surface Method

Ein Optimierungsalgorithmus passt die Variablen in einem Optimierungsproblem so an, dass die Restriktionen eingehalten werden und das Optimierungsziel verbessert wird. Da die Optimierungen in den inneren Schleifen mit LS-OPT ausgeführt werden, können alle Algorithmen verwendet werden, die in der Software implementiert sind (Stander et al. 2019). Die GHT legt die Entwurfsvariablen mit Grenzen fest und liest später die Optimierungshistorie mit den Strukturantworten aller Experimente ein. Bei den Dimensionierungen und/oder Formoptimierungen in der ersten und finalen Iteration wird in der Regel der in LS-OPT implementierte Algorithmus Sequential Response Surface Method (SRSM) eingesetzt und kann auch für die Bewertung der Heuristikentwürfe eingesetzt werden. Der SRSM-Algorithmus hat das Ziel, einen sinnvollen Suchbereich im Designraum auszuwählen und diesen über mehrere Iterationen sukzessive anzupassen und zu verkleinern, bis ein Optimum mit ausreichender Genauigkeit bestimmt ist. Um den SRSM-Algorithmus zu verwenden, müssen für jede Variable initiale Grenzen festgelegt werden. Die GHT wählt für Dickenvariablen als initiale Grenzen den Startwert, multipliziert mit einem von zwei Konfigurationsparametern aus, die z. B. in der Größenordnung 0,6 und 1,4 liegen. Für Formvariablen werden die maximal möglichen Grenzen, wie im vorherigen Abschnitt vorgestellt, bestimmt. Über optionale Faktoren können die Variablenräume in der ersten Iteration der Formoptimierung zusätzlich reduziert werden. In den so festgelegten Variablen Grenzen wird mit einer geeigneten Auswahlmethode (z. B. Space Filling) eine vorgegebene Anzahl an Stützstellen ausgewählt und berechnet, um

Metamodelle für die Zielfunktion und Restriktionen zu bestimmen. Nachdem z. B. ein genetischer Algorithmus auf dem Metamodell eingesetzt wird, um das approximierte Optimum zu finden, wird der Suchbereich und somit die Grenzen der Designvariablen dazu passend verändert, um in der Nähe des approximierten Optimums weiter zu suchen. Hierzu hat SRSM zwei Möglichkeiten:

1. Ist das approximierte Optimum nah bei dem approximierten Optimum der vorherigen Iteration, wird der Suchbereich verkleinert.
2. Wenn das approximierte Optimum am Rand des Suchbereichs liegt, wird der Suchbereich nicht verkleinert, sondern an den Rand des Suchbereichs verschoben, sodass das approximierte Optimum das Zentrum des nächsten Suchbereichs bildet.

Dazwischen findet eine Kombination aus Verkleinerung und Verschiebung des Suchbereichs statt. Das Vorgehen ist detailliert in der Benutzeranleitung (Stander et al. 2019) beschrieben und in **Abbildung 6-5** skizziert. In den Dimensionierungen mit einer Variablen werden in der Regel 5 bis 20 Funktionsaufrufe pro Dimensionierung verwendet, je nach Komplexität des Optimierungsproblems und der Entfernung des Starts vom letztendlichen Optimum. Bei Formoptimierungen mit einer größeren Anzahl an Designvariablen steigt die Anzahl dementsprechend an.

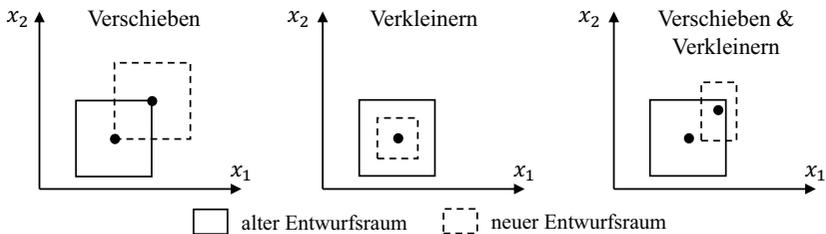


Abbildung 6-5: Anpassung des Suchbereichs durch das Verschieben oder das Verkleinern des Entwurfsraums oder deren Kombination, angelehnt an Stander et al. (2019)

6.5 Effiziente Dimensionierungsstrategie für sich wiederholende Optimierungen mit einer Designvariablen

6.5.1 Relevante Informationen aus vorhandenen Simulationen

Eine hohe Anzahl an nötigen Funktionsaufrufen zur Bewertung der Designs erschwert die Einsatzfähigkeit der GHT. Gerade bei aufwendigen Simulationen von FKV-Strukturen kommen während einer Optimierung schnell Berechnungszeiten zusammen, die selbst auf einem

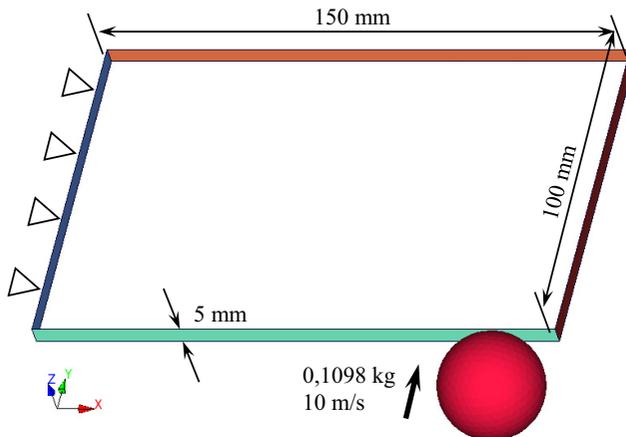
Rechencluster mehrere Tage benötigen. Um den Aufwand der Optimierungen zu reduzieren, wird eine effiziente Optimierungsstrategie für Dimensionierungen mit einer Variablen entwickelt. Diese kann alternativ zu dem Algorithmus SRSM in LS-OPT bei der Bewertung der Heuristikentwürfe eingesetzt werden. Die Variable entspricht hierbei einer Dicke oder einem Dickenskalierungsfaktor, der die Wanddicken skaliert. Im Folgenden wird nur noch der Dickenskalierungsfaktor behandelt, die Strategie ist aber für beide Variablen analog anwendbar. Außerdem wird nur das Vorgehen für eine Minimierung vorgestellt, da jede Maximierung auch als Minimierung der negativen Zielfunktion ausgedrückt werden kann. Von der Strategie wird nicht erwartet, dass sie das globale Optimum findet, da ein leicht schlechterer Entwurf in der Nähe schon reicht, um die Struktur innerhalb des GHT-Ablaufs zu bewerten, wenn dadurch Funktionsaufrufe eingespart werden. Über eine Einstellung in der Konfigurationsdatei kann jederzeit auf einen anderen Algorithmus (i. d. R. einer aus LS-OPT) ausgewichen werden, falls dies gewünscht ist oder die effiziente Dimensionierungsstrategie in einem speziellen Optimierungsproblem nicht wie erwartet funktioniert.

Das entwickelte Vorgehen macht sich zu Nutze, dass innerhalb einer GHT-Optimierung teils hunderte Dimensionierungen von abgewandelten Strukturen durchgeführt werden, ohne dass sich das Optimierungsproblem grundsätzlich ändert. Das erlaubt die Annahme, dass in den meisten Fällen Wissen aus den bisherigen Dimensionierungen einer GHT-Optimierung extrahiert werden kann, um in kommenden Dimensionierungen nützlich eingesetzt zu werden. Um diese Annahme zu rechtfertigen, werden im Folgenden mehrere Dimensionierungen aus GHT-Optimierungen vorgestellt.

Das erste Beispiel basiert auf einem akademischen Rahmenmodell (Ortmann 2015), das sehr kurze Simulationszeiten aufweist und sich dadurch sehr gut für die Untersuchungen eignet. Der Rahmen weist die Maße 150 mm * 100 mm * 5 mm auf und besteht aus Aluminium. Der Rahmen ist an einer Seite in allen Freiheitsgraden eingespannt. Auf der anderen Seite schlägt, wie in **Abbildung 6-6** dargestellt, eine Kugel seitlich mit einer Masse von 0,1098 kg und einer Geschwindigkeit von 10 m/s in den Rahmen ein. Das Optimierungsproblem ist in **Tabelle 6-1** beschrieben. Die Aufgabe der Rahmenstruktur ist, die Kugel mit einer möglichst geringen Verzögerung zu stoppen. Das Stoppen der Kugel wird über die Restriktion geprüft, dass die Y-Geschwindigkeit der Kugel am Ende der Simulation negativ sein muss und somit zurückfliegt. Die Minimierung der Beschleunigung wird über den größten Betrag der gefilterten Y-Beschleunigung der Kugel ausgewertet (SAE-1000Hz-Filter (Alem und Perry 1995)).

Tabelle 6-1: Optimierungsproblem des Rahmenmodells mit der Minimierung der Beschleunigung

Eigenschaft	Wert			
Ziel	Minimiere die maximale Y-Beschleunigung der Kugel (SAE 1000 Hz)			
Restriktion	Y-Endgeschwindigkeit der Kugel	< 0 m/s		
Variable	Skalierungsfaktor für die Wandstärken in den Dimensionierungen			
Fertigungs- restriktionen	Wandverbindungswinkel	> 15 °	Wanddicke	> 1 mm
	Wandabstand	> 10 mm	Wanddicke	< 6 mm
	Wandlänge	> 29 mm		
GHT- Einstellungen	Anzahl konkurrierender Entwürfe $N_{ke} = 5$			
	Abbruchkriterium Iterationen ohne Verbesserung $N_{ioV} = 2$			

**Abbildung 6-6:** Modell Rahmen

In **Abbildung 6-7** und **Abbildung 6-8** werden das Optimierungsziel und die Restriktion aller Dimensionierungen der zweiten Iteration der GHT-Optimierung über den Skalierungsfaktor der Wandstärke in einem Scatterplot aufgetragen. In der Legende sind die Namen der Designs enthalten, die sich aus den Abkürzungen der nacheinander aktivierten Heuristiken, getrennt durch einen Punkt ergeben. Die Abkürzungen sind im Abkürzungsverzeichnis festgehalten. Das „s“ am Anfang aller Namen steht für die Dimensionierung (Sizing) des initialen Entwurfs in der ersten Iteration. Es wird ersichtlich, dass die Strukturantworten der meisten Dimensionierungen im Nahbereich einen Zusammenhang aufweisen, der ausreichend genau mit einem quadratischen Metamodell beschrieben werden kann. Außerdem weisen die verschiedenen

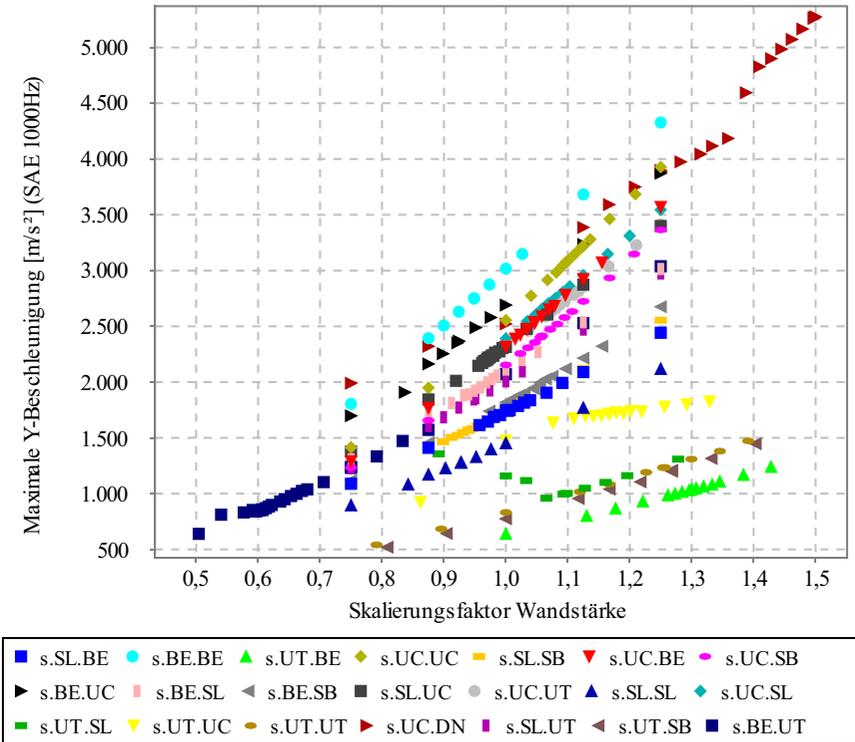


Abbildung 6-7: Rahmenbeispiel: Scatterplot der Zielfunktion gegenüber der Designvariablen aller Dimensionierungen der zweiten Iteration

Dimensionierungen ähnliche Verläufe in den Scatterplots auf. Nur die beiden Entwürfe s.BE.UT (Symbol ■) und s.UT.SL (Symbol ■) weichen besonders bei der Endgeschwindigkeit durch einen S-förmigen Verlauf deutlich von einem linearen oder quadratischen Zusammenhang ab.

Ein anderes Optimierungsbeispiel behandelt einen 600 mm langen Schwellerausschnitt aus Aluminium (Ortmann 2015). Dieser trifft mit einer Geschwindigkeit von 8,056 m/s und einer zusätzlich schiebenden Masse von 85 kg auf einen starren Pfahl. Eine Ansicht des Modells ist in **Abbildung 6-9** dargestellt.

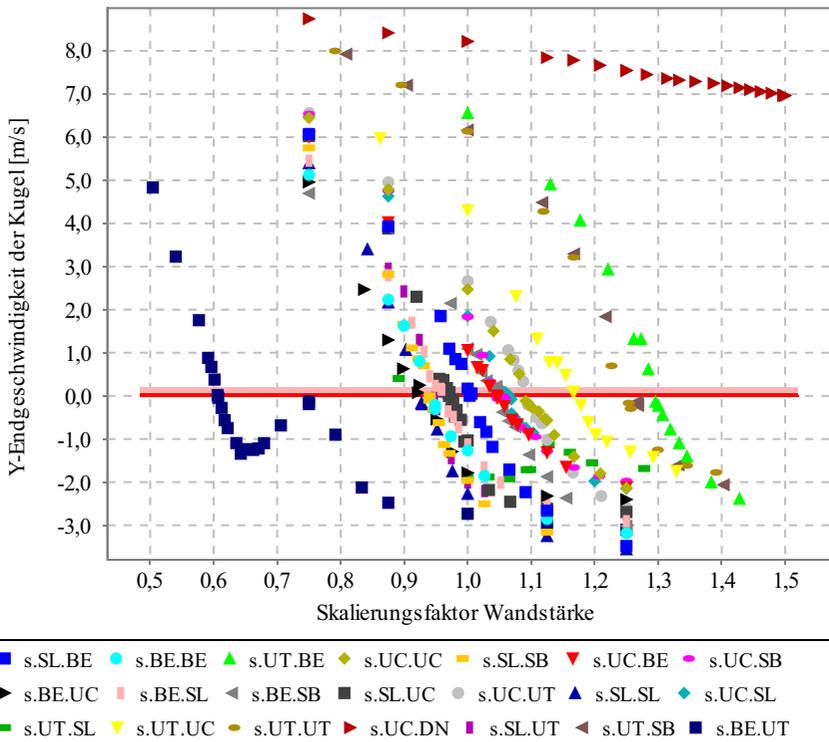


Abbildung 6-8: Rahmenbeispiel: Scatterplot der Restriktion gegenüber der Designvariablen aller Dimensionierungen der zweiten Iteration

In dem zugehörigen Optimierungsproblem in **Tabelle 6-2** soll die maximale Kraft, die auf die schiebende Masse wirkt, minimiert werden, ohne eine zulässige Intrusion zu überschreiten. Die Scatterplots zweier Strukturantworten gegenüber der Variablen sind in **Abbildung 6-10** und **Abbildung 6-11** festgehalten.

Auch hier weisen die betrachteten Strukturantworten regelmäßige Zusammenhänge zur Variablen auf, die im Nahbereich mit quadratischen oder linearen Metamodellen beschrieben werden können. Ebenfalls ähneln sich die Dimensionierungen untereinander und haben ähnliche Verläufe, die vor allem zueinander im Raum verschoben sind. Nur bei den Entwürfen s.UC.BE (Symbol ●) und s.SL.BE (Symbol ■) existieren Abweichungen von diesen idealen Zusammenhängen.

Tabelle 6-2: Optimierungsproblem Schwellerausschnitt

Eigenschaft	Wert
Ziel	Minimiere die maximale Kraft an der schiebenden Wand (SAE 1000 Hz)
Restriktion	Intrusion < 70 mm Masse < 2,801 kg Biegesteifigkeit > 50 % der initialen Biegesteifigkeit Torsionssteifigkeit > 50 % der initialen Torsionssteifigkeit
Variable	Skalierungsfaktor für die Wandstärken in den Dimensionierungen
Fertigungsrestriktionen	Wandverbindungswinkel > 15 ° Wanddicke > 1 mm Wandabstand > 10 mm Wanddicke < 6 mm Wandlänge > 29 mm
GHT-Einstellungen	Anzahl konkurrierender Entwürfe $N_{ke} = 5$ Abbruchkriterium Iterationen ohne Verbesserung $N_{iov} = 1$

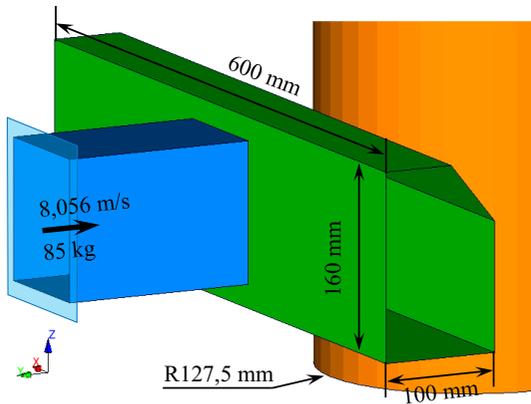


Abbildung 6-9: Modell des Schwellers

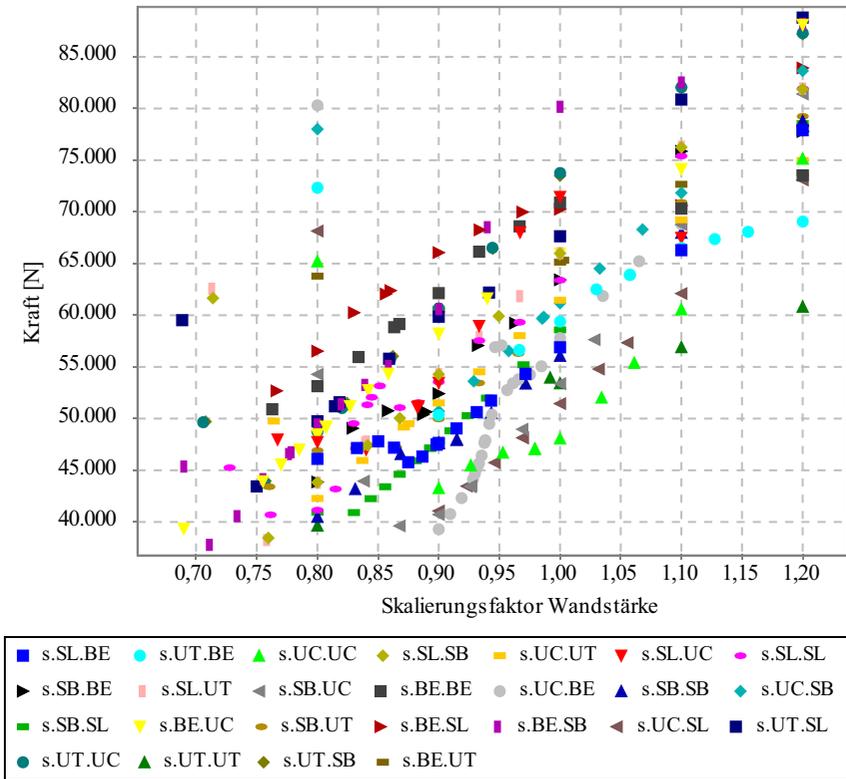


Abbildung 6-10: Schwellerausschnitt: Scatterplot der Zielfunktion gegenüber der Designvariablen aller Dimensionierungen der zweiten Iteration

6.5.2 Erstellung resultierender Metamodelle

Mit der Erkenntnis, dass die meisten Dimensionierungen einen ähnlichen Zusammenhang zwischen der verwendeten Variablen und den Strukturantworten aufweisen, kann versucht werden, diese Zusammenhänge durch ein Metamodell zu erfassen. Mit der Annahme, dass in den noch kommenden Dimensionierungen ähnliche Zusammenhänge vorliegen, kann dieses Metamodell dann genutzt werden, um die Strukturantworten in Abhängigkeit von den Variablen abzuschätzen. Bereits nach der ersten berechneten Stützstelle in einer neuen Dimensionierung, können diese Metamodelle genutzt werden, um die Variablen gezielt so zu verändern, dass die Zielfunktion verbessert wird bzw. die Restriktionsverletzungen reduziert werden. Auch wenn die Zusammenhänge in einer neuen Dimensionierung von dem verwendeten

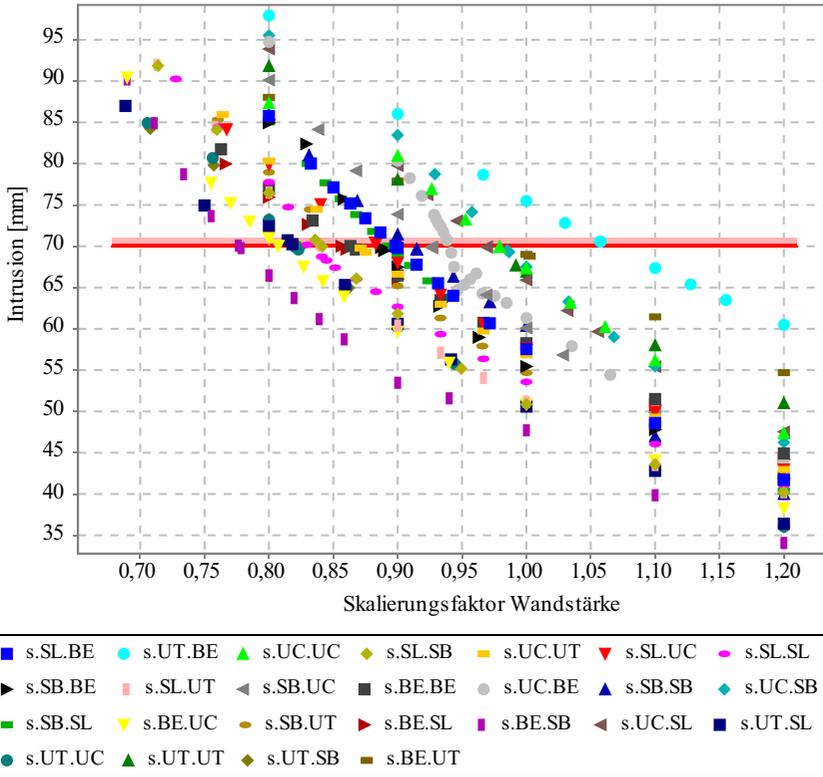


Abbildung 6-11: Schwellerausschnitt: Scatterplot der Intrusionsrestriktion gegenüber der Designvariablen aller Dimensionierungen der zweiten Iteration

Metamodell abweichen, kann davon ausgegangen werden, dass mit dem Metamodell schnell in einen sinnvollen Suchbereich vorgestoßen werden kann, in dem das Optimum wahrscheinlich liegt.

Um solch ein Metamodell bilden zu können, werden in einem ersten Schritt, für alle erfolgreich abgeschlossenen Dimensionierungen der aktuellen und vergangenen Iteration, quadratischen Metamodelle für jede Restriktion g eingeladen. Es werden nur Dimensionierungen berücksichtigt, die mindestens einen Stützpunkt (SP) enthalten, der die Restriktionen erfüllt. Die Metamodelle dieser abgeschlossenen Dimensionierungen wurden bereits während ihrer eigenen Dimensionierungen erzeugt und gespeichert, sodass die Metamodelle an dieser Stelle nicht neu erzeugt werden müssen. Die Metamodelle haben die Form $g(x) = c_2x^2 + c_1x + c_0$

und verwenden als Variable den Dickenskalierungsfaktor x . Das genaue Vorgehen zur Erzeugung der Metamodelle wird noch erklärt, wenn der Ablauf einer Dimensionierung eines Beispielenwurfs mit den dabei erzeugten Metamodellen vorgestellt wird.

Mit den vielen eingeladenen Metamodellen kann im Anschluss ein „verschmiertes“ Metamodell bestimmt werden. Um den Vorgang zu erleichtern, sollen die Metamodelle aufeinander geschoben werden. Hierbei soll das Metamodell vor allem bei Strukturantworten nahe des erlaubten Grenzwerts eine hohe Vorhersagegüte erreichen, da das Optimum in der Regel entweder so liegt, dass die Restriktion gerade erreicht wird und eine genaue Vorhersage nötig ist oder die Restriktion am Optimum viel Luft zum erlaubten Grenzwert hat und eine genaue Vorhersage dann weniger wichtig ist. Um dies zu berücksichtigen, werden die eingeladenen Metamodelle für jede Restriktion so entlang der Abszisse verschoben, dass diese bei einem Dickenskalierungsfaktor von 0 den erlaubten Wert der Restriktion erreichen. Da die quadratischen Metamodelle den Wert der Restriktion zumeist in größerer Entfernung ein zweites Mal erreichen, wird die Stelle gewählt, die näher an dem bisher besten Dickenskalierungsfaktor der Dimensionierung liegt. Mit diesen gesammelten transformierten Metamodellen der Restriktionen wird nun für jede Restriktion ein quadratisches Metamodell aufgebaut, das für die Koeffizienten c_1 und c_2 die Medianwerte der gesammelten Metamodelle verwendet. So wirken sich wenige Metamodelle, die deutlich von den anderen Metamodellen abweichen, nicht auf das abgeschätzte Metamodell aus. Da die Metamodelle durch die Verschiebung alle an der Stelle 0 den Wert der Restriktion annehmen, entspricht der Koeffizient c_0 stets dem Grenzwert der Restriktion g_{limit} . Die verschobenen Metamodelle, inklusive der verschobenen Stützstellen zu der zweiten Iteration des Rahmenbeispiels (Optimierungsproblem siehe **Tabelle 6-1**) mit der neuen Dimensionierungsstrategie, werden in **Abbildung 6-12** dargestellt. Dort findet sich auch das resultierende abgeschätzte Metamodell (*resModel*), das in dem Beispiel $g(x) = 0x^2 + 31,6x + 0$ beträgt. In diesem Fall handelt es sich also um ein lineares Metamodell, da der Median der Koeffizienten c_2 den Wert 0 angenommen hat. Der Koeffizient c_0 ist ebenfalls null, da die Restriktion ihre Grenze g_{limit} in dem Beispiel bei 0 hat. Gerade im Nahbereich um den Variablenwert 0, an dem die Restriktion gerade erfüllt wird, weisen fast alle Metamodelle einen ähnlichen, relativ linearen Verlauf auf und werden gut durch das „verschmierte“ Metamodell *resModel* abgebildet. Das Design s.UT.SL (Symbol ) weicht hier als einziges deutlich von den anderen Dimensionierungen ab, wirkt sich durch die Verwendung der Mediankoeffizienten jedoch nicht auf das resultierende Metamodell aus. Außerdem fand die Dimensionierung von dem Design s.UT.UC (Symbol ) keinen zulässigen Entwurf und wurde deshalb in dem Prozess nicht berücksichtigt.

Das resultierende Metamodell erlaubt hierbei Aussagen zu treffen, um welchen Wert der Dickenskalierungsfaktor je nach dem Wert der Strukturantwort variiert werden muss, um das erlaubte Limit der Restriktion zu erreichen. Je weiter eine Strukturantwort von dem Wert der Restriktion entfernt ist, desto unsicherer werden die Voraussagen, da die zugrundeliegenden SP selbst immer größere Abweichungen zu dem resultierenden Metamodell aufweisen.

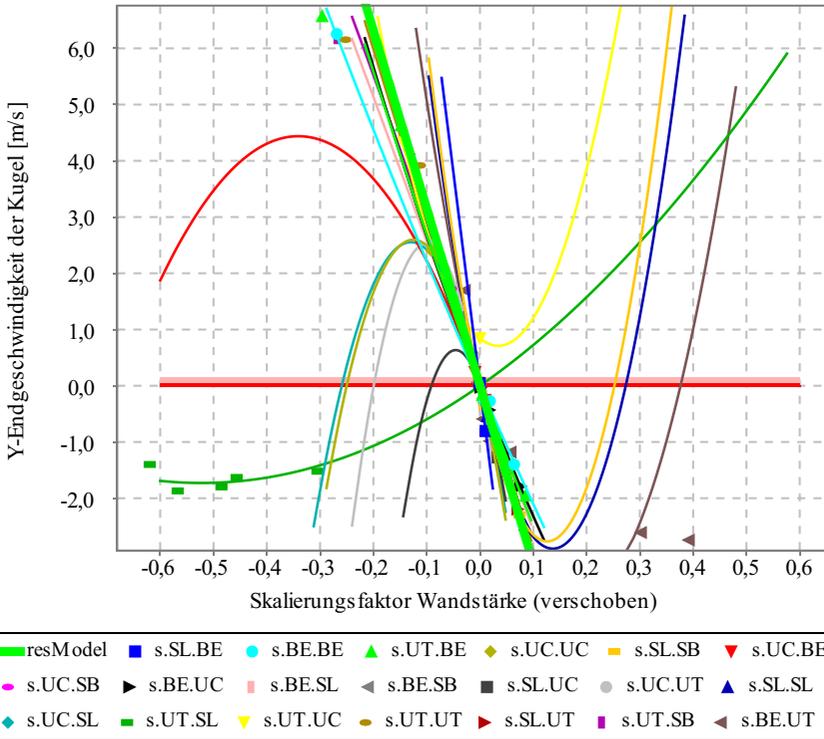


Abbildung 6-12: Rahmenbeispiel mit neuer Dimensionierungsstrategie: Scatterplot und Metamodelle der Restriktion gegenüber der Designvariablen aller Dimensionierungen der zweiten Iteration mit dem resultierenden Metamodell, alle so entlang der Abszisse verschoben, dass sie bei dem Dickenkalierungsfaktor 0,0 den Wert der Restriktion annehmen

Bevor dieses Metamodell in einer neuen Dimensionierung eines Heuristikvorschlags eingesetzt werden kann, muss als erstes ein initialer Entwurf mit dem Dickenkalierungsfaktor von 1,0 mit einem Funktionsaufruf (FE-Simulation) berechnet werden. Falls schon Dimensionierungen von anderen Heuristikentwürfen erfolgt sind, die auf dem gleichen Ausgangsdesign beruhen, wird als initialer Dickenkalierungsfaktor der Medianwert der gefundenen optimalen Dickenkalierungsfaktoren verwendet. Dieses Vorgehen begründet sich in der Beobachtung, dass oft in einer Iteration der GHT je nach Optimierungsproblem entweder ein größerer Anteil der Strukturen aufgedickt oder dünner gestaltet wird. Bei vielen Beispielen können mit zunehmendem Topologiegrad die Wände z. B. dünner ausgeführt werden. Wenn sich also bei anderen Dimensionierungen mit dem gleichen Ausgangsdesign vermehrt Aufdickungen oder Verjüngungen eingestellt haben, kann durch die Verwendung des Medianwertes der bereits

optimierten Dickenskalierungsfaktoren, diese Tendenz aufgegriffen werden und in vielen Fällen schon mit einem besseren Dickenskalierungsfaktor gestartet werden.

Nachdem die Strukturantworten des ersten Stützpunkts (SP_0) vorliegen, kann das mit den Mediankoeffizienten bestückte Metamodell der restringierten Strukturantwort eingesetzt werden, um den nächsten Stützpunkt zu approximieren. Es ist hierbei notwendig, das Metamodell auf dem kürzesten Weg entlang der Abszisse zu verschieben, sodass das verschobene Metamodell der Restriktion $g_0(x)$ den SP_0 trifft. Der Index 0 in $g_0(x)$ deutet hierbei das initial verwendete Metamodell an, das später noch innerhalb einer Dimensionierung mit weiteren berechneten Stützpunkten und einem dann hochzählenden Index aktualisiert wird. Das verschobene Metamodell, das auf dem *resModel* in **Abbildung 6-12** beruht, ist für eine exemplarische Dimensionierung des Designs s.BE.UT.BE im Schritt 1 von **Abbildung 6-13** skizziert. Um die nächste Stützstelle bestimmen zu können, wird noch ein Metamodell für die Zielfunktion benötigt, wie sie in **Abbildung 6-14** im Schritt 1 für das Beispiel skizziert ist. Das Vorgehen zur Bestimmung der Restriktions-Metamodelle kann hierbei nicht angewendet werden, da das Optimum der Zielfunktion nicht bekannt ist und jede Dimensionierung einen

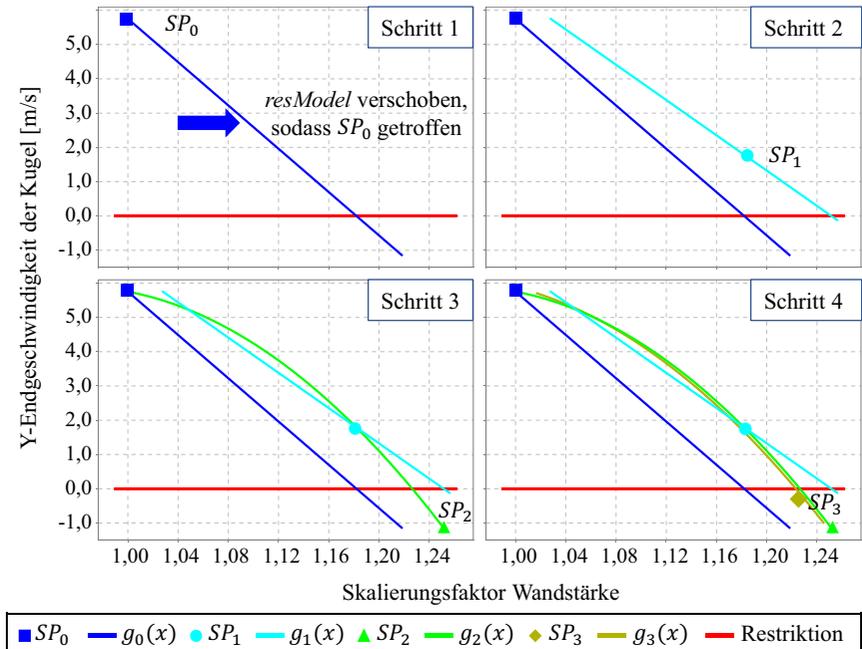


Abbildung 6-13: Rahmenbeispiel mit neuer Dimensionierungsstrategie: Dimensionierungshistorie des Restriktion des Designs s.BE.UT.BE mit den Stützstellen und Metamodellen

eigenen optimalen Wert erreicht. Es existiert somit kein eindeutiger Wert, bei dem man die Metamodelle überlagern könnte. Stattdessen wird im ersten Schritt nur ein lineares Metamodell bestimmt, das durch den ersten Stützpunkt SP_0 läuft. Als Steigung werden die Sensitivitäten der Zielfunktion an den approximierten Optima der erfolgreichen Dimensionierungen der aktuellen Iteration verwendet und der Medianwert ausgewählt. Falls in der aktuellen Iteration keine ausreichende Anzahl an Sensitivitäten vorliegt, werden bei der Medianbestimmung auch noch Werte der vorherigen Iterationen berücksichtigt. Die geforderte notwendige Anzahl ergibt sich aus der aktuellen Iterationsanzahl addiert mit 5, damit besonders in höheren Iterationen, in denen Entwürfe mit einem abweichenden mechanischen Verhalten vorkommen können, diese nicht den Medianwert stellen. So neigen Querschnitte nach der Löschung einer Wand mit der Heuristik *Entfernen unbelasteter Wände* dazu, sich mechanisch anders zu verhalten, als die restlichen Strukturen. Wenn dann in höheren Iteration die Fertigungsrestriktionen das Einziehen neuer struktureller Komponenten verhindern und nur noch die Heuristik *Entfernen unbelasteter Wände* aktiviert werden kann, würde diese die Metamodelle ohne die Berücksichtigung von weiteren Dimensionierungen schnell dominieren und

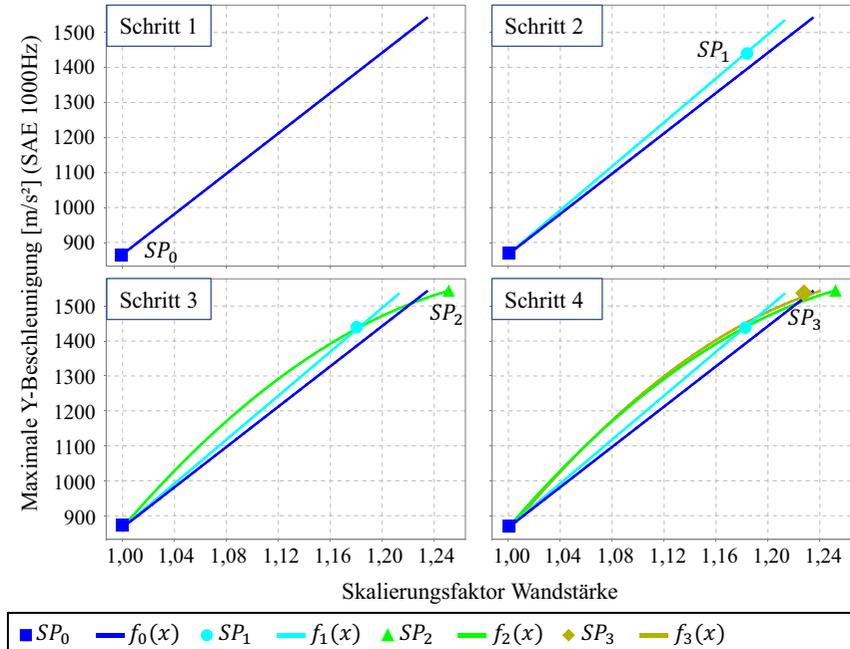


Abbildung 6-14: Rahmenbeispiel mit neuer Dimensionierungsstrategie: Dimensionierungshistorie der Zielfunktion des Designs s.BE.UT.BE mit den verwendeten Stützstellen und Metamodellen

dann eine schlechte Ausgangslage für die möglicherweise noch folgenden Lagenaufbauheuristiken schaffen.

6.5.3 Dimensionierungsprozess

Mit dem quadratischen Metamodell für die Restriktion (das wie in dem Beispiel auch ein lineares Metamodell sein kann, wenn $c_2 = 0$) und dem linearen Metamodell für die Zielfunktion, kann nun analytisch vom ersten Stützpunkt SP_0 auf den nächsten Dickenskalierungsfaktor SP_1 geschlossen werden. Aus den Verläufen ergibt sich, dass in dem Beispiel bei einem Dickenskalierungsfaktor von 1,18 die Restriktion laut der Approximation gerade erfüllt sein sollte und dort darum das Optimum vermutet wird, auch wenn es die Zielfunktion verschlechtert. Da die Zielfunktion zu Beginn durch ein lineares Metamodell beschrieben wird und das gesuchte Minimum dann bei $+\infty$ oder $-\infty$ vorliegt, kann es sein, dass der Optimierer den Dickenskalierungsfaktor direkt auf den minimal oder maximal zulässigen Wert für die Dicke variieren will, wenn die Restriktionen dies in vereinzelt Fällen nicht verhindern. Um dies zu vermeiden, wird die Schrittweite der Variable solange limitiert, bis drei Stützpunkte vorliegen und ein quadratisches Metamodell für die Zielfunktion approximiert werden kann. Um einen Grenzwert festzulegen, wird in der aktuellen und vergangenen Iteration analysiert, wie weit die erfolgreich abgeschlossenen Dimensionierungen den Dickenskalierungsfaktor jeweils vom initialen Wert x_{SP_0} zum optimalen Wert x_{opt} angepasst haben. Die Schrittweiten werden dann der Größe nach sortiert und es wird der Wert $\Delta x_{90\%}$ ausgewählt, unter dem 90 % der Schrittweiten $|x_{opt} - x_{SP_0}|$ liegen, um vereinzelte Dimensionierungen mit stark variierten Variablen nicht zu beachten. Der Wert wird noch mit 1,1 multipliziert und dann als maximal zulässige Schrittweite gesetzt.

Mit dem bestimmten Dickenskalierungsfaktor erhält man nach dem nächsten Funktionsaufruf den nächsten Stützpunkt SP_1 . Im Schritt 2 in **Abbildung 6-13** kann man verfolgen, dass dieser schon deutlich näher an der Restriktion liegt, diese aber noch nicht erfüllt.

Für die Zielfunktion wird jetzt ein lineares Metamodell bestimmt, das durch die beiden bekannten Stützpunkte SP_0 und SP_1 verläuft (siehe **Abbildung 6-14** Schritt 2). Für die Restriktionen gibt es zwei Fälle, wie die Metamodelle erstellt werden:

- Wenn der Restriktionswert zwischen den Werten der Stützpunkte liegt, wird ein lineares Metamodell zwischen den beiden Stützpunkten gebildet.
- Wenn der Restriktionswert größer oder kleiner als die beiden Werte der Stützstellen ist, wird ein lineares Metamodell erzeugt, das durch den Stützpunkt verläuft, der näher an der Restriktion liegt.

Zur Festlegung der Steigung in dem zweiten Fall, wird einerseits die Mediansensitivität g'_{opt} der Restriktion gegenüber dem Dickenskalierungsfaktor an den approximierten Optima er-

folgreich abgeschlossener Dimensionierungen berücksichtigt. Hierbei werden Dimensionierungen der aktuellen Iteration ausgewertet und falls weniger als fünf erfolgreiche Dimensionierungen vorhanden sind, auch Dimensionierungen vorheriger Iterationen. Andererseits wird die Steigung zwischen den beiden schon vorhandenen Stützpunkten g'_{SP} verwendet.

Damit die Dimension der Steigungen keinen Einfluss während der Optimierung hat, werden die Steigungen durch den durchschnittlichen Abstand $d_{SPg_{limit}}$ von der restringierten Strukturantwort g_{SP_0} am SP_0 und g_{SP_1} am SP_1 zum Wert der Restriktion g_{limit} dividiert. Die Formel für diesen durchschnittlichen Abstand lautet:

$$d_{SPg_{limit}} = (|g_{SP_0} - g_{limit}| + |g_{SP_1} - g_{limit}|) / 2 \quad (6-1)$$

Die beiden Steigungsvektoren werden danach normalisiert und addiert, um einen resultierenden Steigungsvektor \vec{g}' zu erhalten:

$$\vec{g}' = \frac{\begin{pmatrix} 1 \\ g'_{opt} \end{pmatrix}}{\left| \begin{pmatrix} 1 \\ g'_{opt} \end{pmatrix} \right|} + \frac{\begin{pmatrix} 1 \\ g'_{SP} \end{pmatrix}}{\left| \begin{pmatrix} 1 \\ g'_{SP} \end{pmatrix} \right|} \cdot \frac{1}{\left| \begin{pmatrix} 1 \\ g'_{opt} \end{pmatrix} \right| + \left| \begin{pmatrix} 1 \\ g'_{SP} \end{pmatrix} \right|} \quad (6-2)$$

Zuletzt wird die zweite Komponente des Vektors \vec{g}' durch seine erste Komponente geteilt, um die Steigung g' zu erhalten.

Die **Abbildung 6-15** zeigt hierzu ein Beispiel mit zwei Stützpunkten. In dem Beispiel liefert das bestimmte Metamodell einen guten Kompromiss zwischen der zu geringen Steigung zwischen den Stützpunkten und der zu großen approximierten Steigung der Optima bisheriger Dimensionierungen.

Mit den nun vorhandenen Metamodellen für die Zielfunktion und die Restriktion, kann die nächste Dickenvariable bestimmt werden. Die maximale Schrittweite ist wie zuvor noch limitiert. Bei dem Beispiel in **Abbildung 6-13** liegt der SP_2 in Schritt 3 nun innerhalb der Restriktion, könnte aber noch näher an die Restriktion herankommen, um das Optimierungsziel zu verbessern. Da nun drei Stützpunkte vorliegen, kann mit diesen ein quadratisches Metamodell für die Zielfunktion und die Restriktionen approximiert werden und direkt der nächste Stützpunkt SP_3 bestimmt werden (siehe Schritt 4 in **Abbildung 6-13**).

Sobald vier oder mehr Stützstellen vorliegen, werden die quadratischen Metamodelle für die Restriktionen und die Zielfunktion mit einer gewichteten quadratischen Regression bestimmt. Der Programmcode zur Regression wurde basierend auf einem Codeausschnitt zur gewichteten linearen Regression (Fair 2008) für die quadratische Regression erweitert. Für die verwendete Gewichtung w wird folgende Formel verwendet:

$$w = \begin{cases} 0,0001 + 9765625^{x-\tilde{x}}, & \text{für } x < \tilde{x}, \\ 0,0001 + 9765625^{\tilde{x}-x}, & \text{für } x \geq \tilde{x}. \end{cases} \quad (6-3)$$

Hierbei entspricht \tilde{x} der Stelle, an dem die Gewichtung den Wert 1 erreichen soll. Die Basis ist so gewählt, dass die Gewichtung im Fall von $\tilde{x} = 1,0$ an den Stellen $x = 0,9$ und $x = 1,1$ bereits auf einen Wert von 0,2 abfällt, mit dem Ziel, dass Stützstellen entfernt von der angegebenen Stelle \tilde{x} schnell an Bedeutung verlieren. Die Funktion strebt auf beiden Seiten gegen den Minimalwert 0,0001, sodass entfernte Stützpunkte noch einen minimalen Einfluss haben und keine numerischen Probleme auftreten. Die Gewichtungsfunktion für $\tilde{x} = 1,0$ ist in **Abbildung 6-16** dargestellt.

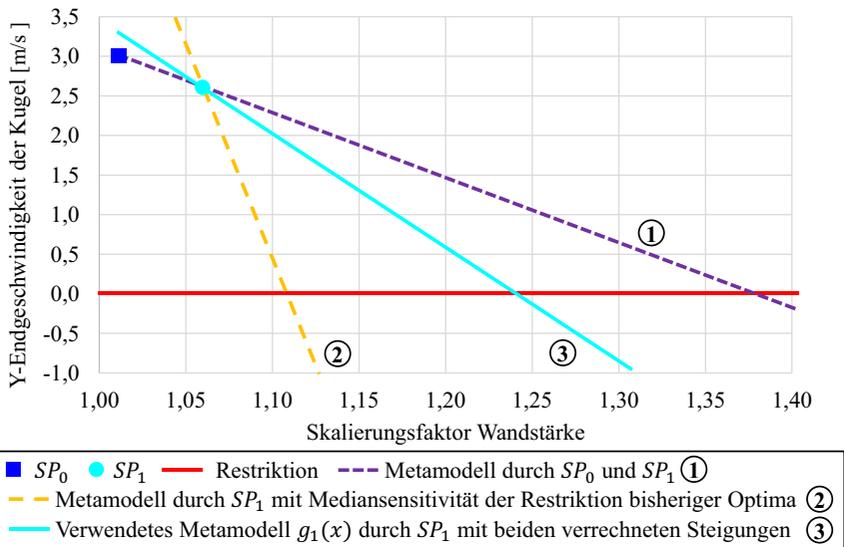


Abbildung 6-15: Beispiel zur Bestimmung des Metamodells für die Restriktion

In einem ersten Schritt wird für \tilde{x} der Dickenskalierungsfaktor des bisher besten Stützpunkts der Dimensionierung verwendet. Nachdem die Metamodelle für die Zielfunktion und die Restriktionen mit den Gewichtungen und der quadratischen gewichteten Regression erstellt werden, wird das Optimum analytisch bestimmt. Da das approximierte Optimum noch eine nennenswerte Distanz zum besten Experiment aufweisen kann, wird die Regression und die Metamodellbildung in einem zweiten Schritt nochmal wiederholt. Nun wird jedoch die Stelle des approximierten Optimums für \tilde{x} in (6-3) eingesetzt. Die neu bestimmten Metamodelle

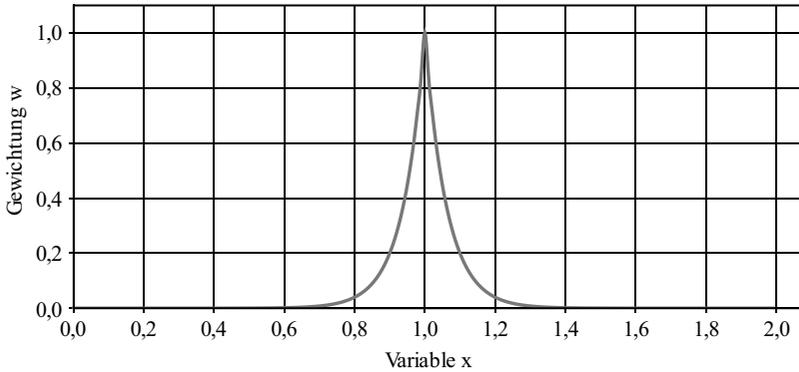


Abbildung 6-16: Gewichtungsfunktion für $\tilde{x} = 1$

können dann dazu verwendet werden, die nächste Stützstelle auszuwählen und den Funktionsaufruf damit zu starten. Die gewählte Gewichtung wird verwendet, damit Stützstellen in großer Entfernung von der optimalen Stelle einen möglichst geringen Einfluss auf das Metamodell haben und dadurch primär der Nahbereich approximiert wird. Der Prozess geht so lange weiter, bis eine neu gewählte Stützstelle x_{new} eine vorgegebene Distanz zu der am nächsten liegenden schon berechneten Stützstelle x_{closest} unterschreitet:

$$|x_{\text{new}} - x_{\text{closest}}| < 0,01x_{\text{SP}_0} \quad (6-4)$$

In diesem Abbruchkriterium entspricht der verwendete Grenzwert 1 % des initialen Dickenkalierungsfaktors x_{SP_0} der aktuellen Dimensionierung. Falls in einer Entfernung von $0,02x_{\text{SP}_0}$ noch keine Stützstelle vorliegt, die die Restriktionen erfüllt, wird jedoch noch ein Funktionsaufruf angestoßen, um diese möglichst zu erfüllen. Damit dieser Funktionsaufruf mit einer größeren Wahrscheinlichkeit die Restriktionen erfüllt, wird x_{new} vor dem Start des Funktionsaufrufs um $0,01x_{\text{SP}_0}$ in Richtung der Restriktionserfüllung variiert. Die Richtung wird hierbei mit den Metamodellen bestimmt. So kann das Risiko gemindert werden, dass der neue Funktionsaufruf bei x_{new} knapp die Restriktionen verfehlt. Als Nachteil wird in vielen Fällen die Zielfunktion dadurch geringfügig schlechter. Das wird an dieser Stelle jedoch in Kauf genommen, um weitere Funktionsaufrufe vermeiden zu können. Dies entspricht dem übergeordneten Ziel der Dimensionierungsstrategie, mit möglichst wenigen Funktionsaufrufen, eine ausreichend genaue Bewertung des Heuristikentwurfs abgeben zu können.

Wurde die neue Stelle berechnet und die Restriktionen wurden dennoch nicht erfüllt, können zwei Fälle eintreten, bei denen final noch einmal ein Funktionsaufruf ausgeführt wird:

- Wenn die gesamte Dimensionierung noch keinen Stützpunkt aufweist, der die Restriktionen erfüllt, wird die Stelle zu $x_{\text{new}} +/ - 0,02x_{\text{SP}_0}$ angepasst. Das $+/ -$ bedeutet hierbei, dass das Vorzeichen gewählt wird, das die Stelle in Richtung der Restriktionserfüllung ändert. Mit der bestimmten Stelle wird der Funktionsaufruf ausgeführt.
- Wenn es schon Stützpunkte gab, die die Restriktionen erfüllen, wird eine neue Stelle bei $x_{\text{new}} +/ - 0,04x_{\text{SP}_0}$ in Richtung der Restriktionserfüllung gewählt. Wenn hier in einem Abstand von $0,03x_{\text{SP}_0}$ noch keine Stützstelle existiert, die die Restriktionen erfüllt, wird der Funktionsaufruf ausgeführt.

Der gesamte Dimensionierungsprozess ist in dem Schema in **Abbildung 6-17** festgehalten. In diesem wiederholt sich die Abfolge aus *Wahl der Metamodelle*, *Approximation der nächsten Stützstelle*, *Überprüfung des Abbruchkriteriums* und *Berechnung der nächsten Stützstelle*, bis das Abbruchkriterium erfüllt ist. Die Festlegung der Metamodelle unterscheidet sich, wie schon erklärt, mit zunehmender Anzahl der bereits berechneten Stützpunkte. Danach können, wie zuletzt vorgestellt, noch bis zu zwei Stützpunkte berechnet werden, falls in der Nähe des approximierten Optimums noch keine Stützstellen vorliegen, die die Restriktionen erfüllen. In dem beschriebenen Beispiel s.BE.UT.BE werden insgesamt vier Stützpunkte berechnet, da der nächste Stützpunkt SP_4 zu nah an SP_3 liegen würde, welcher bereits die Restriktionen erfüllt (siehe **Abbildung 6-13** Schritt 4) und damit das Abbruchkriterium erreicht wird. Damit hat diese Dimensionierung schon überdurchschnittlich viele Funktionsaufrufe benötigt. In dem gesamten Optimierungsdurchlauf wurden 104 Dimensionierungen mit durchschnittlich 3,5 Funktionsaufrufen ausgeführt. **Abbildung 6-18** gibt in einem Balkendiagramm für diesen gesamten Durchlauf an, wie viele Dimensionierungen mit der jeweils angegebenen Anzahl an Funktionsaufrufen ausgekommen sind. Die meisten Dimensionierungen haben drei Funktionsaufrufe verwendet. Eine einzelne Dimensionierung hat hier sieben Funktionsaufrufe benötigt, dafür haben sechs andere Dimensionierungen sogar schon nach einem Funktionsaufruf ihr Abbruchkriterium erreicht. In diesen Fällen hat der erste Funktionsaufruf die Restriktion bereits erfüllt und die approximierte nächste Stützstelle wäre zu nah gewesen.

6.5.4 Verwerfung schlechter Entwürfe

Mit der umgesetzten Strategie kommen die Dimensionierungen bereits mit sehr wenig Funktionsaufrufen aus. Bei der Betrachtung der berechneten Stützstellen in Iteration 2 des Rahmenbeispiels (**Abbildung 6-19** oben) fällt jedoch schnell auf, dass noch weiteres Einsparpotential bestehen könnte. So werden z. B. für das Design s.SL.UC (Symbol ■) drei Stützpunkte berechnet, die eine Beschleunigung über 3000 m/s^2 aufweisen. Schon nach der Berechnung des ersten Stützpunkts, hätte man mit großer Sicherheit feststellen können, dass der Entwurf nicht zu den besten Designs der Iteration zählen wird, die es in die nächste Iteration schaffen. So gibt es in der Iteration sechs Entwürfe, die bereits eine Beschleunigung unter 1400 m/s^2 aufweisen.

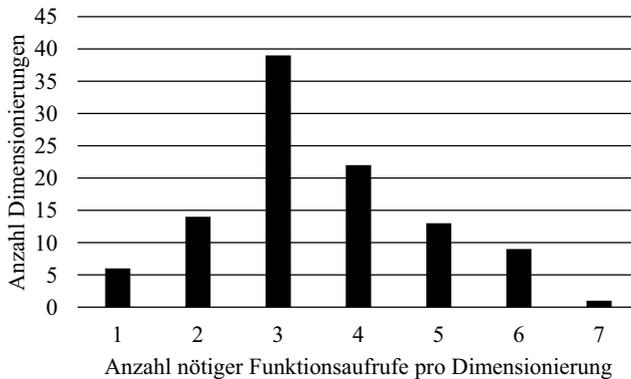


Abbildung 6-18: Balkendiagramm mit der Anzahl der Dimensionierungen, die die angegebene Anzahl an Funktionsaufrufen benötigt haben, in einer vorgestellten GHT-Optimierung des Rahmenmodells unter Verwendung der Dimensionierungsstrategie

Um hier weitere Funktionsaufrufe zu sparen, werden die Dimensionierungen solcher schlechter Entwürfe möglichst frühzeitig abgebrochen. Um dies zu erreichen, wird ein Abbruchkriterium eingeführt, das nach jeder Optimierung basierend auf den Metamodellen prüft, ob die approximierte Zielfunktion f^* größer als ein ermittelter Grenzwert ist:

$$(f^* - |\Delta x| \cdot 2\sigma(f')) > f_{\text{limit}} \quad (6-5)$$

Um den Wert f_{limit} festzulegen, werden die Zielfunktionen aller bereits erfolgreich abgeschlossenen Dimensionierungen in der aktuellen GHT-Optimierung betrachtet. Als Grenzwert f_{limit} wird die $|N_{\text{ke}}|$ -beste (standardmäßig $|N_{\text{ke}}| = 5$) bisherige Zielfunktion ausgewählt. Da innerhalb der Iteration Dimensionierungen nacheinander stattfinden können und f_{limit} vor dem Starten einer Dimensionierung neu bestimmt wird, kann sich der Wert innerhalb einer Iteration verändern. Da die Approximationen auf den Metamodellen nicht exakt sind und mit zunehmendem Abstand von den bereits bestimmten Stützstellen die Vorhersagegüte abnimmt, wird noch ein zusätzlicher Term von der approximierte Zielfunktion f^* subtrahiert, um eine reduzierte Zielfunktion zu erhalten. Diese berücksichtigt, dass die Zielfunktion in der Realität besser und somit niedriger sein könnte, als durch das Metamodell vorhergesagt. Der Term setzt sich zusammen aus dem Betrag der aktuellen Schrittweite Δx vom letzten Stützpunkt zum approximierte Optimum, multipliziert mit der doppelten Standardabweichung σ der approximierte Sensitivitäten f' der Zielfunktion an den Optima vergangener Dimensionierungen. Gerade bei großen $|\Delta x|$ mit unsichereren Vorhersagen für die Zielfunktion, werden so die Entwürfe nicht voreilig verworfen. Da nicht nur die Approximation der Zielfunktion ungenau sein kann, sondern auch die Metamodelle der Restriktionen, kann folglich auch Δx bei der Bestimmung des Optimums zu groß oder klein gewählt worden sein.

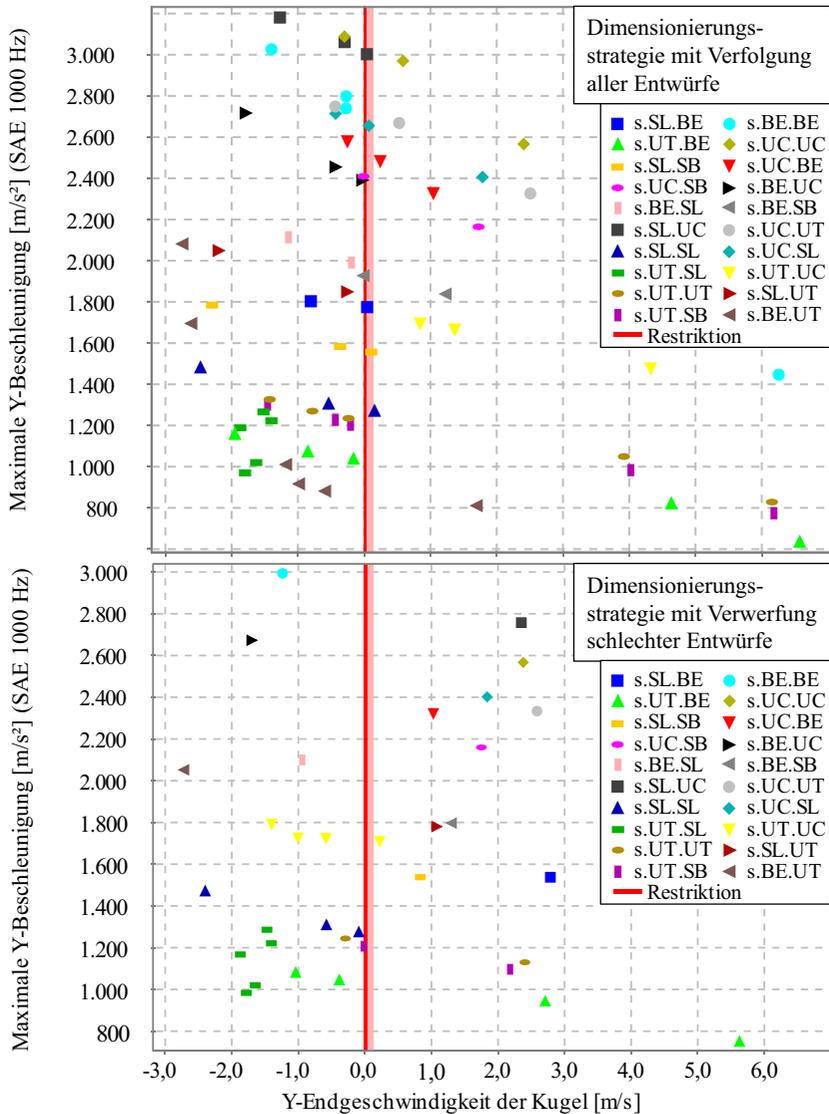


Abbildung 6-19: Rahmenbeispiel: Scatterplot der Zielfunktion gegenüber der Restriktion in Iteration 2, oben mit Verfolgung aller Entwürfe, unten mit Verwerfung schlechter Entwürfe

Darum wird für alle bisherigen Dimensionierungen mit mehr als einem Stützpunkt, für alle berechneten Experimente mit dem jeweiligen Index j , der Faktor $k_{\Delta x, j}$ bestimmt, der das Verhältnis aus der Entfernung zur optimalen Stelle x_{opt} der gesamten Dimensionierung zu der Entfernung der damals tatsächlich gewählten nächsten Stützstelle x_{j+1} bestimmt und im Anschluss mit 1 subtrahiert. Da bei einer zu kleinen Schrittweite das Rauschen von Strukturantworten einen zu großen Einfluss darstellen könnte, wird der Faktor nur bestimmt, wenn die nächste Stützstelle mehr als 5 % von der aktuellen Stützstelle entfernt ist:

$$k_{\Delta x, j} = \frac{x_{\text{opt}} - x_j}{x_{j+1} - x_j} - 1 \quad \text{für} \quad \left| \frac{x_{j+1} - x_j}{x_j} \right| > 0,05 . \quad (6-6)$$

Die optimale Stelle wird für die abgeschlossenen Dimensionierungen basierend auf den zuletzt gebildeten Metamodellen für jedes Design separat bestimmt. Ein Wert von $k_{\Delta x, j} > 0$ deutet dann ein zu kurz gewähltes Δx hin, das um den angegebenen Anteil hätte größer gewesen sein müssen und analog ein Wert von $k_{\Delta x, j} < 0$ ein zu groß gewähltes Δx , das hätte kleiner gewählt werden müssen.

Als nächstes wird für alle $k_{\Delta x, j}$ aller Optimierungen, die größer als 0 sind, ein Medianwert $\tilde{k}_{>0}$ bestimmt und auf gleiche Weise ein Medianwert $\tilde{k}_{<0}$ mit allen Werten kleiner 0.

Die beiden Medianfaktoren werden dann verwendet, um während den Optimierungen mit der Dimensionierungsstrategie noch eine reduzierte Schrittweite $\Delta x_a = \Delta x \cdot (1 + 2\tilde{k}_{<0})$ und eine vergrößerte Schrittweite $\Delta x_b = \Delta x \cdot (1 + 2\tilde{k}_{>0})$ zu bestimmen. Durch den Faktor 2 wird gewährleistet, dass die tatsächliche optimale Schrittweite sehr wahrscheinlich zwischen Δx_a und Δx_b liegt. Mit den beiden Schrittweiten können die Zielfunktionen f_a^* und f_b^* approximiert und auch in (6-5) eingesetzt werden. Nur wenn in allen drei Fällen die approximierte Zielfunktion größer ist als der Grenzwert, wird die Dimensionierung abgebrochen, um Funktionsaufrufe zu sparen.

Das Vorgehen wird für das Design s.SL.UT (Symbol ►) aus **Abbildung 6-19** (unten) beispielhaft vorgestellt. Der erste Stützpunkt SP_0 weist bei einem Dickenskalierungsfaktor von 0,92 eine Zielfunktion von 1781 m/s² auf und eine Endgeschwindigkeit von 1,08 m/s, sodass die Restriktion nicht erfüllt wird. Basierend auf den vorherigen Dimensionierungen werden Metamodelle gebildet (Abschnitt 6.5.2), die bei einem Dickenskalierungsfaktor von 0,948 die Erfüllung der Restriktion mit einer Zielfunktion von 1820 m/s² approximieren. Die fünf-beste bisherige Zielfunktion der vergangenen Dimensionierungen der aktuellen GHT-Optimierung und somit f_{limit} beträgt 1244 m/s². Mit der Formel (6-5) und der Standardabweichung σ der approximierten Sensitivitäten f' der Zielfunktion von 967 m/s² sowie der Schrittweite Δx von 0,028, ergibt sich die reduzierte Zielfunktion von 1766 m/s². Der Wert f_{limit} wird somit deutlich überschritten. Weitere Überprüfungen werden mit der reduzierten und vergrößerten Schrittweite $\Delta x_a = 0,012$ und $\Delta x_b = 0,046$ und den zugehörigen approximierten Zielfunktionen 1800 m/s² und 1850 m/s² durchgeführt. Auch hier übersteigen die damit errechneten,

reduzierten Zielfunktionen den Grenzwert f_{limit} deutlich. Da alle drei reduzierten Zielfunktionen den erlaubten Wert überschreiten, wird das Design nicht weiterverfolgt. In **Abbildung 6-20** ist dieser Prozess skizziert und das Metamodell der Zielfunktion, die von Δx abhängige reduzierte Zielfunktion sowie der Grenzwert f_{limit} eingetragen. Das Design wäre nur weitergekommen, wenn das approximierte Optimum unter einem Dickenskalierungsfaktor von 0,764 gelegen hätte, da hier wie dargestellt, die reduzierte Zielfunktion erstmals unter der Verwerfungsgrenze liegen würde. Der Einfluss dieser Strategie kann in **Abbildung 6-19** (unten) nachvollzogen werden. In dem Scatterplot sind alle Dimensionierungen der zweiten Iteration des Rahmenbeispiels eingetragen. Nur eine Dimensionierung mit einer Zielfunktion über 1500 m/s² hat einen zweiten Stützpunkt berechnet. Diese Ausnahme ist das Design s.UT.UC (Symbol ∇), da dieses als viertes Design in der Iteration bewertet wurde und zu diesem Zeitpunkt der Wert f_{limit} noch größer war. Es sei darauf hingewiesen, dass die Stützstellen in **Abbildung 6-19** in den beiden Scatterplots nicht übereinstimmen müssen, da die vorherige Iteration leicht abweichende optimale Skalierungsfaktoren für die Wandstärke bestimmt haben kann. Die **Abbildung 6-21** zeigt im Vergleich zu **Abbildung 6-18** auf, dass die GHT-Optimierung des Rahmenmodells mit dem Verwerfen schlechter Designs nun zum

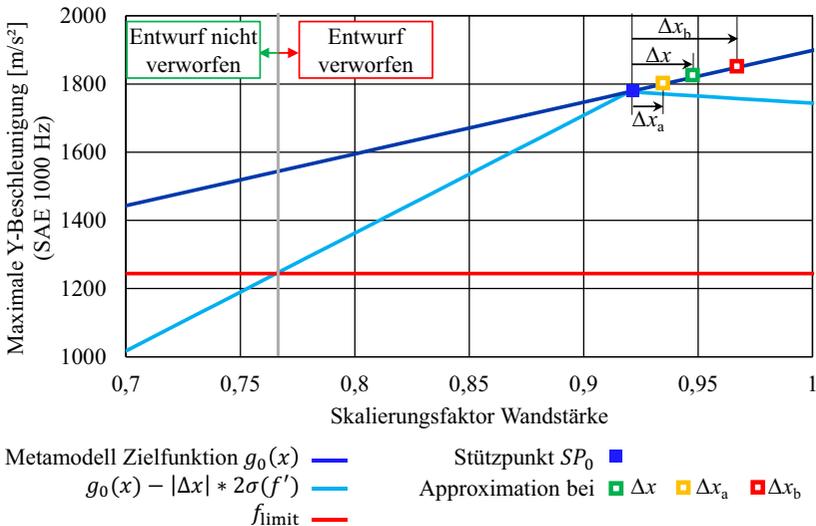


Abbildung 6-20: Prüfung zur Verwerfung schlechter Designs, in Abhängigkeit des approximierten Optimums, mit dem Metamodell der Zielfunktion, der von Δx abhängigen reduzierten Zielfunktion, zur Berücksichtigung der Approximationsfehler, und der Verwerfungsgrenze f_{limit} , am Beispiel des Designs s.SL.UT, bei dem für alle drei Schrittweiten die Verwerfungsgrenze überschritten wird

Großteil Dimensionierungen mit einem einzelnen Funktionsaufruf aufweist und deutlich weniger Dimensionierungen mit drei oder mehr Funktionsaufrufen, wodurch der Ressourcenaufwand deutlich sinkt.

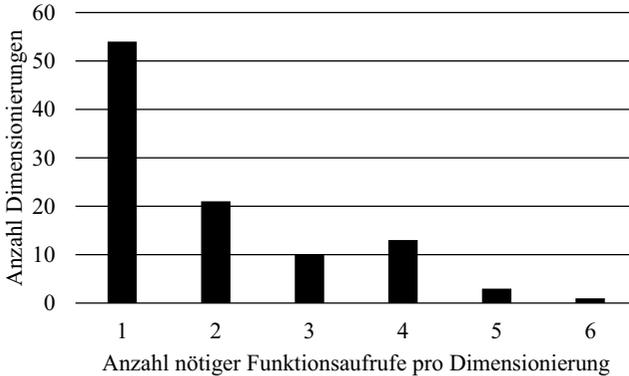


Abbildung 6-21: Balkendiagramm mit der Anzahl der Dimensionierungen, die die angegebene Anzahl an Funktionsaufrufen benötigt haben, in einer beispielhaften GHT-Optimierung des Rahmenmodells unter Verwendung der Dimensionierungsstrategie und der Verwerfung schlechter Designs

6.5.5 Vergleich der Dimensionierungsstrategien

Um die Performance der beiden Dimensionierungsstrategien besser einordnen zu können, werden die Untersuchungen von vier Optimierungsstrategien vorgestellt. Neben dem bereits in **Tabelle 6-1** vorgestellten Optimierungsproblem der Beschleunigungsminimierung für den Rahmen und der in **Tabelle 6-2** beschriebenen Kraftminimierung für den Schwellerausschnitt, werden in **Tabelle 6-3** und **Tabelle 6-4** noch zwei weitere Optimierungsprobleme mit einer geänderten Zielfunktion und Restriktion für den Rahmen vorgestellt, in denen einmal die Masse des Rahmens und einmal die kinetische Energie am Ende des Simulation minimiert werden soll.

Tabelle 6-3: Optimierungsproblem des Rahmenmodells mit der Minimierung der Rahmenmasse

Eigenschaft	Wert
Ziel	Minimiere die Masse des Rahmens
Restriktion	Y-Endgeschwindigkeit der Kugel < 0 m/s
	Y-Verschiebung der Kugel < 70 mm

Tabelle 6-4: Optimierungsproblem des Rahmenmodells mit der Minimierung der kinetischen Energie

Eigenschaft	Wert
Ziel	Minimiere die kinetische Energie der Kugel am Ende der Simulation
Restriktion	Y-Verschiebung der Kugel < 50 mm

In **Tabelle 6-5** werden für die vier Optimierungen die erreichte Zielfunktion, die jeweilige Veränderung zur Zielfunktion des initialen Entwurfs, die Anzahl der Funktionsaufrufe und die durchschnittliche Anzahl der Funktionsaufrufe pro Dimensionierung für die neue Dimensionierungsstrategie ohne und mit dem Verwerfen schlechter Entwürfe (**DS 1/ DS 2**) mit einer Referenzoptimierung verglichen. Die Referenzoptimierung benutzt den in Abschnitt 6.4 beschriebenen Optimierungsalgorithmus **SRSM**. Im Vergleich zu den Referenzoptimierungen fallen die Zielfunktionen der neuen Dimensionierungsstrategien in fünf Fällen leicht schlechter aus, in zwei Fällen leicht besser und in einem Fall identisch. Die größte Verbesserung im Vergleich zu **SRSM** liegt bei der Minimierung der kinetischen Energie des Rahmens vor, bei der **DS 2** eine um 6,9 % größere Verbesserung zum initialen Entwurf finden konnte. Bei der Massenminimierung des Rahmens hat **DS 2** im Vergleich zu **SRSM** dafür eine um 3,3 % geringere Verbesserung zum initialen Design gefunden. **DS 1** und **DS 2** haben somit in Bezug auf die erreichte Zielfunktion eine sehr vergleichbare Performance zu **SRSM**.

Bei einem Blick auf die durchschnittliche benötigte Anzahl an Funktionsaufrufen pro Dimensionierung wird jedoch der Vorteil deutlich, dass in allen Beispielen der Simulationsaufwand erheblich gesunken ist. **DS 1** konnte die Anzahl der Funktionsaufrufe pro Dimensionierungen um 74,3 % bis 79,7 % senken und die **DS 2** sogar um 83,9 % bis 88,7 %. Auch wenn es ggf. noch effizientere Algorithmen als den **SRSM**-Algorithmus gibt oder effizientere Parameter-einstellungen, um den Ressourcenbedarf der Referenzoptimierung noch etwas zu reduzieren, ist kein Dimensionierungsalgorithmus bekannt, der in der GHT-Optimierung mit ähnlich wenigen Funktionsaufrufen auskommen könnte wie **DS 2**. Dafür ist die Strategie nur anwendbar, wenn man eine große Anzahl an Dimensionierungen mit dem gleichen restringierten Optimierungsproblem mit einer Variablen durchführt und die zu optimierenden Strukturen sich sehr ähneln, was den Anwendungsbereich außerhalb der GHT stark einschränkt. Auch müssen die Strukturantworten zumindest im untersuchten Bereich ausreichend genau durch quadratische Metamodelle approximiert werden können. Durch den verringerten Ressourcenaufwand kann die GHT-Methode auch für aufwendigere, nicht akademische Beispiele angewendet werden, wo zumeist nur wenige hundert Funktionsaufrufe zur Verfügung stehen. Es muss betont werden, dass die Funktionsaufrufe innerhalb einer Dimensionierung mit der neuen Strategie nicht parallel ausgeführt werden können, da die Stützpunkte aufeinander aufbauen. Dafür können die Dimensionierungen innerhalb einer GHT-Iteration alle parallel ausgeführt

werden. Damit können die Dimensionierungen aber nur auf die Informationen der vorherigen Iterationen zugreifen und nicht schon auf Ergebnisse der aktuellen Iteration. Wie viele Berechnungen maximal parallel erfolgen dürfen, kann durch zwei Einstellparameter für die zulässige Anzahl an Funktionsaufrufen zu den Arbeitszeiten und außerhalb der Arbeitszeiten (In der Nacht und am Wochenende) festgelegt werden. Derzeit wird die Dimensionierungsstrategie nicht automatisch ausgewählt, sondern in der Konfigurationsdatei festgelegt. Es ist denkbar zukünftig das Vorgehen dahingehend anzupassen, dass die GHT-Optimierung selbst festlegt, welche Strategie eingesetzt wird.

Tabelle 6-5: Vergleich der neuen Dimensionierungsstrategien mit dem Referenzdimensionierungsalgorithmus anhand verschiedener Optimierungsbeispiele

Optimierung / Ziel	Kennwert	SRSM	DS 1	DS 2
Rahmen min. Beschleunigung (initial ² 3069 m/s ²)	Funktionsaufrufe gesamt	1814	387	222
	Funktionsaufrufe pro Dim. ¹	17,30	3,51	1,95
	Min. Beschleunigung [m/s ²]	661	682	684
	Verbesserung zu Startentwurf	-78,5 %	-77,8 %	-77,7 %
Rahmen min. Masse (initial ² 0,211 kg)	Funktionsaufrufe gesamt	2949	508	309
	Funktionsaufrufe pro Dim. ¹	12,28	3,15	1,45
	Min. Masse [kg]	0,119	0,126	0,112
	Verbesserung zu Startentwurf	-43,6 %	-40,3 %	-46,9 %
Rahmen min. kinetische Energie (initial ³ 0,383 J)	Funktionsaufrufe gesamt	3343	820	599
	Funktionsaufrufe pro Dim. ¹	16,80	4,09	2,31
	Min. Kinetische Energie [J]	0,0659	0,0767	0,0395
	Verbesserung zu Startentwurf	-82,8 %	-80,0 %	-89,7 %
Schweller min. Kraft (initial ³ 50951 N)	Funktionsaufrufe gesamt	714	157	125
	Funktionsaufrufe pro Dim. ¹	12,96	2,75	2,09
	Min. Kraft [N]	43406	43567	43406
	Verbesserung zu Startentwurf	-14,8 %	-14,5 %	-14,8 %

¹ Ohne die zwei Dimensionierungen in der ersten und letzten Iteration, da diese mit dem SRSM-Algorithmus ausgeführt werden

² Wert der initialen Struktur ohne innere Wände nach der ersten Dimensionierung in Iteration 0

³ Wert der Struktur nach der ersten Heuristikiteration, da Iteration 0 die Restriktion nicht erfüllte

Falls die mit den neuen Strategien ermittelten Stützpunkte z. B. mehrmals zu weit von den Voraussagen der Metamodelle abweichen, könnten die bisher ermittelten Stützpunkte extrahiert werden und der Referenzalgorithmus mit diesen bereits vorhandenen Informationen gestartet werden. Auch könnte der Einsatz anderer Metamodelle erprobt werden, da die quadratischen Metamodelle zwar einfach integriert werden konnten, jedoch nicht sehr flexibel sind.

6.6 Identifizierung von Entwürfen mit einem abweichenden Strukturverhalten

Wenn eine Optimierung eine verbesserte Struktur findet, ist nicht klar, ob diese sich auch robust verhält. Dies meint, ob sich das strukturelle Verhalten auch bei geringfügigen Abweichungen der Geometrie, des Lagenaufbaus, der Materialeigenschaften oder der Belastung noch ähnlich verhält und nicht deutlich schlechter wird. Durch die Arbeiten mit den Heuristiken werden zwar generell mechanisch sinnvolle Strukturen angestrebt, nicht immer müssen sich diese jedoch robust verhalten.

Um die Robustheit zuverlässig zu bewerten, müssten mehrere hundert oder tausend Simulationen durchgeführt werden, in denen unter anderem Materialkennwerte, die Lastfalldefinition und geometrische Maße variiert werden, um die Streuung der Strukturantworten zu erfassen. Solch umfangreiche Untersuchungen können im Ablauf der GHT nicht durchgeführt werden, da oft mehr als hundert Entwürfe erzeugt werden und eine vollständige Robustheitsuntersuchung für alle Designs den verfügbaren Rahmen an Simulationsressourcen haltlos überschreiten würde. Dennoch werden die Entwürfe in der GHT zumeist mit einer Dimensionierung mit mehreren Funktionsaufrufen bewertet. Die Informationen dieser Aufrufe können genutzt werden, um Designs zu identifizieren, die schon bei der Dickenvariation in der Dimensionierung ein von den anderen Entwürfen abweichendes Verhalten aufzeigen. Damit ist gemeint, dass die Zusammenhänge zwischen der Variable und den Strukturantworten im Vergleich zu den anderen Entwürfen deutlich unregelmäßiger sind und dieses Verhalten nur schlecht mit den in Abschnitt 6.5 verwendeten Metamodellen beschrieben werden kann.

Um diese Unregelmäßigkeiten in einer Dimensionierung zu identifizieren, wird zuerst mit den Stützpunkten SP_i , die für die Bewertung eines Entwurfs verwendet wurden, für jede Strukturantwort f mittels gewichteter Regression ein quadratisches Metamodell bestimmt. Die Gewichtung w_{SP_i} beträgt bei der Variablen des besten Experiments 1,0 und fällt dann wie in Formel (6-3) beschrieben, schnell zu beiden Seiten dieses Wertes ab. Mit dem so bestimmten Metamodell kann die durchschnittliche gewichtete Abweichung $\overline{\Delta f}$ zwischen den Funktionswerten f_{SP_i} und den jeweils zugehörigen Approximationen $f_{SP_i}^*$ aller N_{SP} Stützpunkte der Dimensionierung wie folgt berechnet werden:

$$\overline{\Delta f} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{SP}} (f_{SP_i} - f_{SP_i}^*)^2 \cdot w_{SP_i}}{\sum_{i=1}^{N_{SP}} w_{SP_i}}} \quad (6-7)$$

Die Distanzen zwischen den Approximationen und den tatsächlichen Strukturantworten werden gewichtet, um Abweichungen nahe am Optimum eine höhere Bedeutung zu schenken. Der Wert wird in der Optimierungshistorie für jedes Design und jede Strukturantwort angegeben. Wenn für die Dimensionierung eines Entwurfs deutlich größere Werte $\overline{\Delta f}$ bestimmt werden, als für die anderen Entwürfe, kann dies ein unrobustes Verhalten gegenüber Änderungen der Dicke andeuten.

Zum besseren Verständnis werden für zwei Dimensionierungen aus der Beschleunigungsminimierung des Rahmens aus dem vorherigen Abschnitt die Scatterplots der Zielfunktion gegenüber dem Dickenskalerungsfaktor vorgestellt. Wie **Abbildung 6-22** zu entnehmen ist, weist die Dimensionierung des Entwurfs s.UT.SB.UC einen sehr gleichmäßigen Verlauf zwischen der Variable und der Zielfunktion auf. Der Entwurf s.UT.SB.SB zeigt in **Abbildung 6-23** hingegen einen ungleichmäßigen Verlauf. Die Zielfunktion steigt bei einem

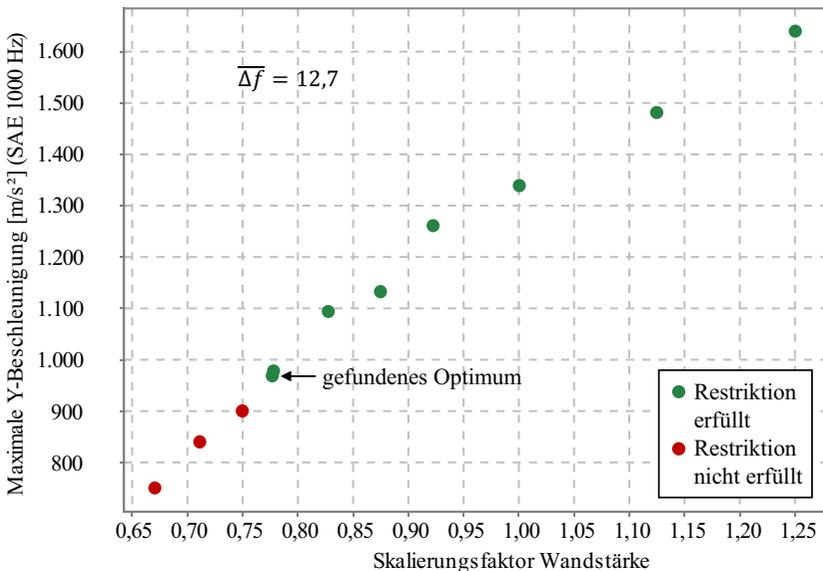


Abbildung 6-22: Scatterplot der Zielfunktion gegenüber der Designvariablen aus der Dimensionierung des Entwurfs s.UT.SB.UC aus der Beschleunigungsminimierung des Rahmenmodells

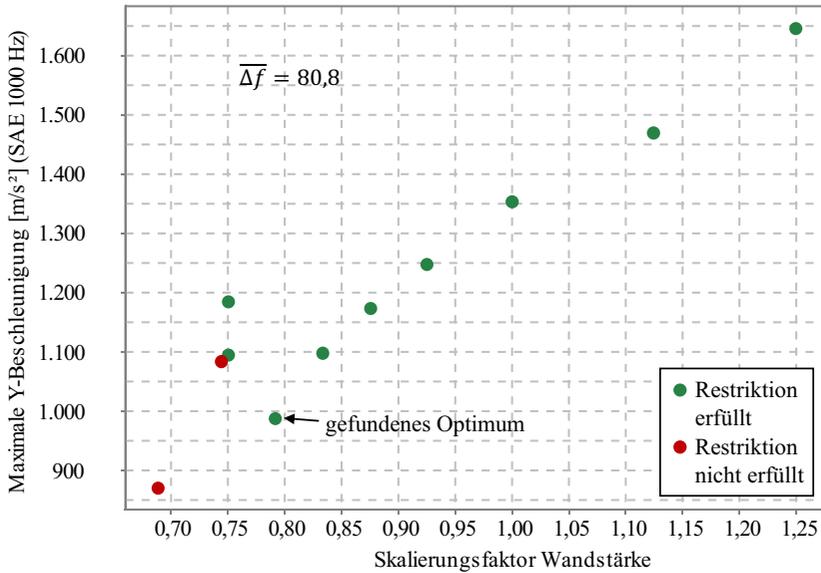


Abbildung 6-23: Scatterplot der Zielfunktion gegenüber der Designvariablen aus der Dimensionierung des Entwurfs s.UT.SB.SB aus der Beschleunigungsminimierung des Rahmenmodells

Dickenskalierungsfaktor in der Nähe von 0,75 sprunghaft an. Dieses unregelmäßige Verhalten zeigt sich auch bei der durchschnittlichen gewichteten Abweichung $\overline{\Delta f}$ zwischen den Funktionswerten und den zugehörigen Approximationen in **Tabelle 6-6**. Die beiden Entwürfe erreichen eine sehr ähnliche Zielfunktion, der Wert $\overline{\Delta f}$ ist bei s.UT.SB.SB aber 6,4 mal größer als bei s.UT.SB.UC und erkennt somit den unregelmäßigen Verlauf.

Tabelle 6-6: Durchschnittliche gewichtete Abweichung der Zielfunktion gegenüber dem Dickenskalierungsfaktor für zwei Entwürfe und die zugehörigen Dimensionierungen aus der Beschleunigungsminimierung des Rahmens

Entwurf	Zielfunktion [m/s ²]	$\overline{\Delta f}$ [m/s ²]
s.UT.SB.UC	968,5	12,7
s.UT.SB.SB	986,9	80,8

Der Wert $\overline{\Delta f}$ wird innerhalb eines GHT-Durchlaufs ohne einen zusätzlichen Ressourcenaufwand bestimmt und kann damit eine zusätzliche Hilfe bei der Auswahl der Designs bieten, er wird jedoch noch nicht automatisch bei der Bewertung der Entwürfe berücksichtigt. Leider

können die Werte nur für Dimensionierungen angegeben werden, die mindestens vier Funktionsaufrufe verwendet haben, da bei weniger Funktionsaufrufen das quadratische Metamodell die Stützstellen genau trifft und somit nicht beurteilt werden kann, ob die Stützstellen nahe des Optimums deutlich von dem Metamodell entfernt sind und dadurch möglicherweise weniger robust sind als die anderen Entwürfe. Bei dem Einsatz der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Dimensionierungsstrategien **DS 1** und **DS 2** wird diese Anzahl oft unterschritten, sodass hier nur in einigen Fällen $\overline{\Delta f}$ bestimmt werden kann. Es ist jedoch nicht sinnvoll, eine Mindestanzahl an Funktionsaufrufen für jede Dimensionierung festzulegen, da damit der Ressourcenaufwand der gesamten Optimierung ansteigt und gerade in früheren Iterationen die Robustheit nicht immer relevant sein muss, da durch weitere Topologie- oder Lagenaufbauveränderungen in höheren Iterationen die Struktur wieder robuster werden kann. Darum ist es künftig je nach Bedarf weiterhin nötig, für die besten in der GHT gefundenen Entwürfe, Robustheitsuntersuchungen nach der Optimierung durchzuführen. Es ist zu beachten, dass Entwürfe mit niedrigen Werten für $\overline{\Delta f}$ keines Falls robust sein müssen, da in den Dimensionierungen nur die Dicke variiert wird und somit keine Aussagen über das Verhalten z. B. bei geänderten Material-, Lastfall- oder Geometrieparametern getroffen werden können. Vergleichsweise große Werte von $\overline{\Delta f}$ können jedoch ein starkes Indiz für eine unrobuste Struktur sein, die nicht weiterverfolgt werden sollte.

7 Anwendungsbeispiele Mehrkammerprofil

7.1 Beschreibung des Strukturmodells

Nach der Vorstellung der Methodik im Allgemeinen, werden nun konkrete Optimierungen vorgestellt. Als Anwendungsbeispiel wird ein aus Tapes gewickeltes Mehrkammerprofil gewählt, das lateral von einem Fallgewicht getroffen wird. Das Profil lagert auf zwei starren Zylindern mit einem Durchmesser von 40 mm und wird mittig von einem weiteren starren Zylinder mit dem gleichen Durchmesser und einer Masse von 20,8 kg sowie einer Geschwindigkeit von 13,89 m/s entgegen der Z-Richtung getroffen (**Abbildung 7-1**). Das Fallgewicht ist 2° um die X-Achse geneigt, da sich das Fallgewicht in einem Versuch geringfügig neigen könnte und diese für die Struktur anspruchsvollere unsymmetrische Belastung als Basis genommen wird. In dem Modell ist eine Erdbeschleunigung von $9,81 \text{ m/s}^2$ entgegen der Z-Richtung aktiv. Der quadratische Querschnitt des initialen Startentwurfs besteht aus einer inneren und äußeren *Chamber* mit einer Wandstärke von jeweils 3,9 mm und einem Lagenaufbau von $[\pm 87^\circ_2 / \pm 10^\circ_2 / \pm 45^\circ_2]$ (von innen nach außen), in dem bereits die minimal und maximal zulässige Orientierung von 10° und 87° berücksichtigt wird. Der Querschnitt weist eine Höhe und Breite von 100 mm auf, wobei dieses Maß sich auf die Grenzfläche zwischen dem inneren und äußeren Profil bezieht und die Dicke der äußeren *Chamber* somit noch zu dem Außenmaß hinzukommt. Die Innenradien der inneren *Chambers* betragen 6,5 mm. Mit der verwendeten Elementkantenlänge von ca. 4 mm werden so drei Elemente entlang der Ver rundungen erzeugt. Die wickelbaren Orientierungen weichen bei dem initialen Design um maximal $0,84^\circ$ bei den $\pm 87^\circ$ -Lagen, $5,15^\circ$ bei den $\pm 10^\circ$ -Lagen und $1,16^\circ$ bei den $\pm 45^\circ$ -Lagen von dem angegebenen Lagenaufbau ab, da die erzielbaren Winkel von der Umfangslänge und der vorhandenen Tapebreite von 12 mm abhängen. Die GHT korrigiert die Orientierungen von alle Wickelprofilen automatisch vor der Erzeugung der FE-Modelle, damit das Tape im Herstellprozess ohne Überlappungen an eine andere Tapebahn angelegt werden kann (vgl. Abschnitt 3.3.3).

Für das Profil werden insgesamt drei verschiedene Längen betrachtet: 100, 300 und 700 mm. Auch die Abstände der Auflagezylinder werden dementsprechend zu 60, 240 und 580 mm angepasst. Mit einer zunehmenden Länge des Profils nimmt der Biegeanteil während der Belastung zu und der laterale Kompressionsanteil ab. Die verschiedenen Lastfälle werden im Weiteren dazu genutzt, um den Einfluss auf den resultierenden Lagenaufbau zu betrachten.

Für die Berechnung der FE-Modelle wird der Solver LS-DYNA verwendet und darin vollintegrierte Schalenelemente (Elementformulierung 16) für die Berechnung genutzt. Die einzelnen *Chambers* definieren ihren Lagenaufbau mit einem `*PART_COMPOSITE`, in der jede

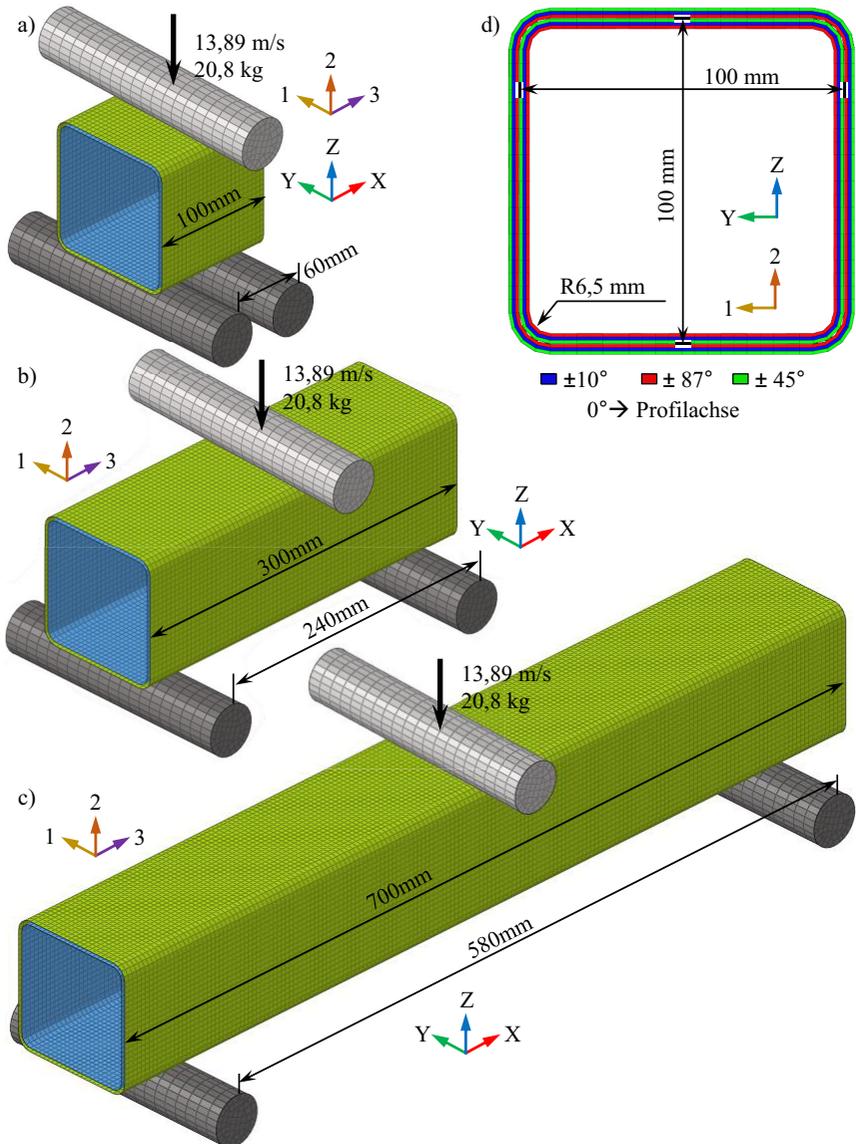


Abbildung 7-1: Strukturmodell des 100 mm langen Profils (a), Strukturmodell des 300 mm langen Profils (b), Strukturmodell des 700 mm langen Profils (c) und Querschnitt der initialen Profilstruktur mit dick visualisierten Schalelementen und einer farbigen Hervorhebung der Faserorientierungen der einzelnen Lagengruppen (d)

definierte Lage einem Integrationspunkt über die Dicke entspricht. Als Material für die Struktur werden Tapes aus Carbonfasern und einer PA6-Matrix³ mit einer Dicke von 0,13 mm verwendet. Der Faservolumengehalt beträgt 48,5 %. Die Matrix findet wegen der Schweißbarkeit und den kurzen Prozesszyklen eine breite Anwendung bei FKV-Strukturen, bringt jedoch den Nachteil der Wasseraufnahmefähigkeit mit sich. Bei Versuchen erfordert dieses Material somit eine Konsolidierung auf einen vorgegebenen Feuchtigkeitsanteil in dem Bauteil. Als Keyword für das Materialmodell wird in LS-DYNA ein *MAT_LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC verwendet, dessen Materialkennwerte einem Zwischenstand aus dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierten Projekt *Entwicklung eines optimierungsgerechten Werkstoffmodells für die automatisierte Topologie- und Formfindung von Crashstrukturen aus thermoplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden* (Donhauser et al. 2022; Schneider et al. 2019; Schneider et al. 2021; Donhauser 2020) entsprechen. In dem Projekt wurden verschiedene Tests zur Materialcharakterisierung durchgeführt. Ein Simulationsmodell mit dem 300 mm langen Profil mit dem entsprechenden Material und konkreten Kennwerten für die *Tiebreak*-Kontakte, ist in einem Repository veröffentlicht (Schneider et al. 2021). Es sei darauf hingewiesen, dass die Kennwerte der *Tiebreak*-Kontakte in dem DFG-Projekt mit deutlich weniger Versuchen charakterisiert wurden und teilweise generische Werte verwendet wurden, sodass diese vor einem Einsatz in einer realen Auslegung noch validiert werden sollten. Für die Anwendung der Optimierungsmethodik in dieser Arbeit ist dies jedoch nicht kritisch, da die Inputdecks bei Bedarf ohne Aufwand ausgetauscht werden können. Um Imperfektionen in dem Simulationsmodell zu berücksichtigen, werden alle Knotenkoordinaten und Schalenelementdicken mit einer Zufallsverteilungsfunktion um durchschnittlich 0,005 mm perturbiert. Die Simulationen werden terminiert, sobald das Fallgewicht vollständig gestoppt wurde und es anfängt, sich zurück zu bewegen.

Die sich für die drei Profillängen ergebenden Deformationen, nachdem die Fallgewichte jeweils gestoppt werden, sind in **Abbildung 7-2** dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass das 100 mm-Profil lateral zerdrückt wird, das 300 mm-Profil lokal stark durch das Fallgewicht deformiert wird und sich leicht biegt und zuletzt das 700 mm-Profil lokal eingedrückt wird und sich nach der Schwächung deutlich durchbiegt.

In den folgenden drei Abschnitten werden Optimierungen mit verschiedenen Zielfunktionen vorgestellt. In jedem Abschnitt wird jeweils noch eine der folgenden Fragestellungen mit untersucht:

- Wie wirken sich die unterschiedlichen Profillängen auf die Optimierungsergebnisse aus?
- Wie effizient arbeiten die verschiedenen Dimensionierungsstrategien bei Anwendungen mit FKV-Profilen?
- Welchen Einfluss haben verschiedene Einstellungen für die Lagenaufbauheuristiken?

³ CELSTRAN® CFR-TP PA6 CF60-03 von der Firma Celanese

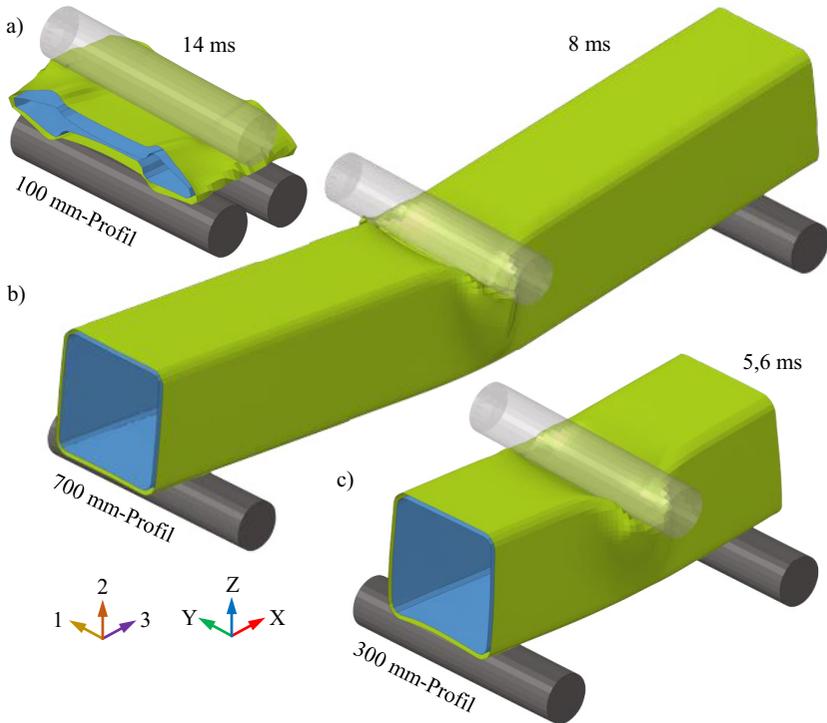


Abbildung 7-2: Deformationen der initialen Entwürfe des 100 mm-Profils bei 14ms (a), des 700 mm-Profils bei 8ms (b) und des 300 mm-Profils bei 5,6ms (c)

7.2 Massenminimierung mit Verschiebungsrestriktion und mehreren Profillängen

In einem ersten Optimierungsproblem soll die Masse m der Profile minimiert werden, ohne dass die Verschiebung des Fallgewichts d_z 60 mm überschreitet. Dadurch wird gewährleistet, dass die Struktur das Fallgewicht in jedem Fall stoppt, bevor sie „auf Block“ geht. Die Fertigungsrestriktionen sind so gewählt, dass die Strukturen im Tapewickelverfahren hergestellt werden können. Es werden jeweils die fünf besten Designs einer Iteration an die folgende Iteration übergeben ($N_{ke} = 5$). Nach einer Dimensionierung der Dicke des Ausgangsdesigns in der ersten Iteration, werden in den folgenden Iterationen die Topologieheuristiken aktiviert, bis eine Iteration keine Verbesserung mehr erzielen kann ($N_{ioV} = 1$). Danach werden die Lagenaufbauheuristiken aktiviert, bis auch hier eine Iteration keine Verbesserung mehr findet.

Die Optimierung endet dann mit einer Formoptimierung des bisher besten Designs. In den Dimensionierungen für die Bewertung der Heuristikentwürfe wird die interne Dimensionierungsstrategie **DS 2** mit der Verwerfung schlechter Designs eingesetzt (siehe Abschnitt 6.5). Als Variable werden in diesen die Wanddicken mit einem Faktor skaliert. Diese Optimierungseinstellungen werden für alle noch beschriebenen Optimierungen eingesetzt, wenn an der jeweiligen Stelle nichts anderes angegeben ist. Das komplette Optimierungsproblem ist in der **Tabelle 7-1** zusammengefasst. Um den Fertigungsaufwand zu limitieren, wird die maximale *Chamber*-Anzahl auf 7 festgelegt und der minimale Wandverbindungswinkel auf $44,5^\circ$. Je kleiner ein Verbindungswinkel ist, desto mehr wird während der Verrundung an der Ecke abgeschnitten, sodass zu spitze Winkel durch den gewählten Grenzwert verhindert werden. Durch die verwendete Symmetrie zur lokalen Y-Achse können einige der inneren Profile mehrmals in der Struktur eingesetzt werden, was ebenfalls die Herstellung erleichtert.

Tabelle 7-1: Optimierungsproblem zur Massenminimierung des Mehrkammerprofils

Eigenschaft	Wert			
Ziel	Minimiere die Masse m des FKV-Profiles			
Restriktion	Z-Verschiebung d_z des Fallgewichts < 60 mm			
Variable	Einheitlicher Skalierungsfaktor für die Wandstärken und in finaler Iteration zusätzliche Formvariablen			
Fertigungs- restriktionen	Wandverbindungswinkel	$> 44,5^\circ$	Wandlänge	> 29 mm
	Wandabstand	> 10 mm	Wanddicke	$> 1,04$ mm
	<i>Chamber</i> -Anzahl	≤ 7	Wanddicke	< 5 mm
	<i>Chamber</i> -Umfangslänge	> 72 mm	Lagenwinkel	$10^\circ < \text{Lagenwinkel} < 87^\circ$
	Innerer Wickelradius	$> 6,5$ mm		oder
	Lokale Symmetrie	Y-Achse		$-87^\circ < \text{Lagenwinkel} < -10^\circ$
GHT- Einstellungen	Anzahl konkurrierender Entwürfe $N_{ke} = 5$			
	Abbruchkriterium Iterationen ohne Verbesserung $N_{iov} = 1$			
	Dimensionierungsstrategie DS 2 (siehe Abschnitt 6.5)			

Wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, werden die Simulationsdaten durch die Heuristiken zum Teil mit einem Raster ausgewertet und zuvor noch transformiert. Die verwendete Länge der Rastereinträge entspricht hier der dreifachen Elementkantenlänge, sodass im Schnitt neun Finite Elemente einem Eintrag des Rasters zugeordnet werden. Eine Visualisierung für das Raster des Startentwurfs des 300 mm-Profiles zu Beginn und am Ende der Simulation findet sich in **Abbildung 7-3**. Das Raster liegt hierbei im lokalen Koordinatensystem vor, in dem die Z-Achse der Profilachse entspricht und die X- und Y-Achse den Achsen des 2D-Graphen. Es

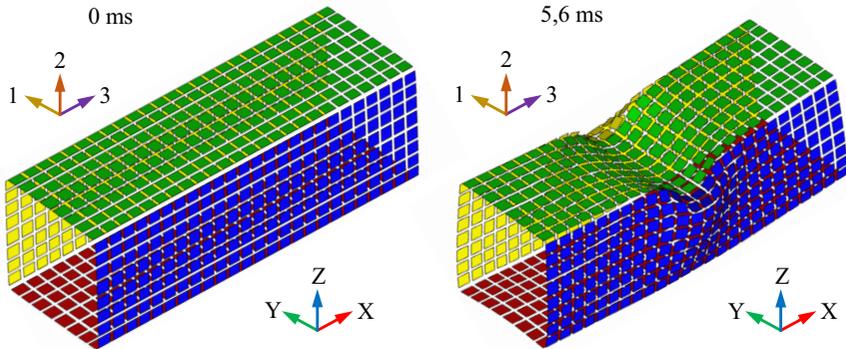


Abbildung 7-3: Visualisierung des Auswertungsrasters im initialen (links) und letzten Zeitpunkt (rechts) mit unterschiedlichen Farben je nach *Edge*-Zugehörigkeit

wird ersichtlich, dass das Raster in der Lage ist, das Deformationsverhalten abzubilden (vgl. **Abbildung 7-2 c**). Die Optimierungen erfolgen auf dem Rechencluster Pleiades⁴ der Bergischen Universität Wuppertal. Die LS-DYNA-Berechnungen⁵ mit jeweils 16 CPUs benötigen für das 300 mm-Profil ca. 10 min für die Berechnung.

Da alle Entwürfe einer Iteration parallel bewertet werden, ist die Optimierung mit dem 300 mm-Profil bereits nach 9 Stunden fertig. Eine Übersicht der Optimierungshistorie findet sich in **Tabelle 7-2**.

Tabelle 7-2: Optimierungshistorie der Massenminimierung des 300 mm-Profiles

Iteration	Aktion	m [g]	d_z [mm]	F_z [kN]	Simulationen
0	Dimensionierung	1011,7	58,2	56,5	21
1	Topologieheuristiken	915,6	58,3	75,3	14
2	Topologieheuristiken	815,9	56,7	71,9	51
3	Topologieheuristiken	728,2	58,3	57,4	15
4	Topologieheuristiken	-	-	-	0
5	Lagenheuristiken	687,5	59,7	60,7	63
6	Lagenheuristiken	669,3	59,5	44,0	51
7	Lagenheuristiken	664,3	59,3	58,6	47
8	Lagenheuristiken	664,3	58,8	56,7	35
9	Formoptimierung	648,7	59,7	57,1	298

⁴ <http://pleiades.uni-wuppertal.de/> (zuletzt geprüft am 18.03.2022)

⁵ Die Version lautet: ls-dyna_mpp_s_R12_0_0_x64_centos65_ifort160_avx2_openmpi4.0.0

Die Optimierung beginnt in der nullten Iteration mit einer Dimensionierung, um die Dicke der Struktur mit einem einheitlichen Skalierungsfaktor auf das Optimierungsproblem einzustellen und somit dem Optimierungsziel zu folgen, ohne die Restriktionen zu verletzen. Nach insgesamt 21 Simulationen wird mit einer Wandstärke von 2,84 mm das 1011,7 g schwere lokale Optimum gefunden, das mit einer Intrusion von 58,2 mm nah an der Restriktion von 60 mm liegt. In den drei darauffolgenden Iterationen werden die Topologieheuristiken konkurrierend aktiviert und jeweils die fünf besten Designs in die nächste Iteration übergeben. Insgesamt werden 25 Topologien in den inneren Optimierungsschleifen mit der Dimensionierungsstrategie bewertet. Alle bewerteten Querschnitte sind in **Abbildung 7-4** festgehalten.

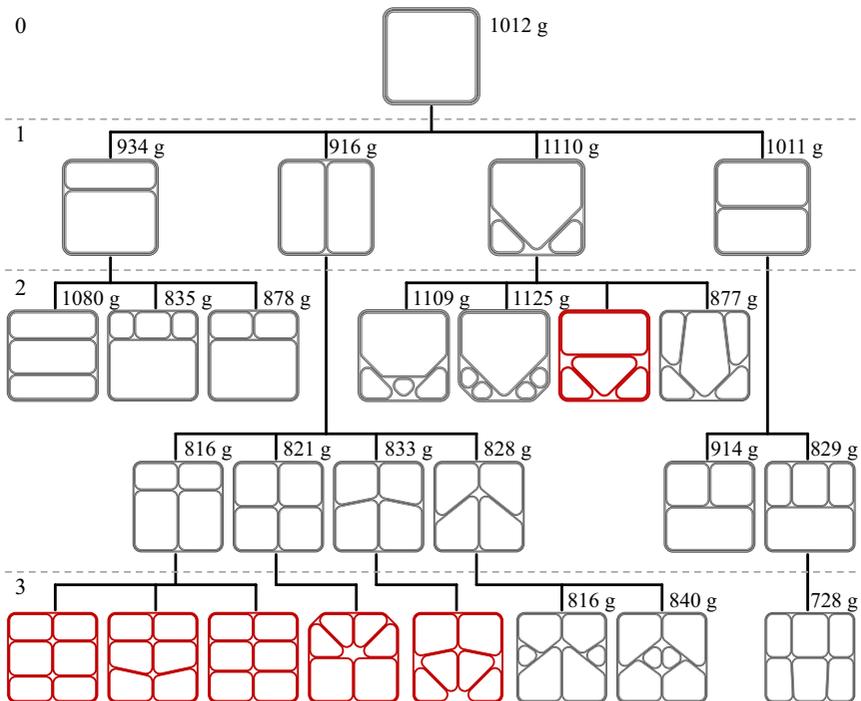


Abbildung 7-4: Historie der Querschnitte, die während der Optimierung des 300 mm-Profiles bis Iteration 3 von den Topologieheuristiken vorgeschlagen und bewertet werden (alle gezeigten Querschnitte erfüllen die Fertigungsrestriktionen), jeweils mit Angabe der Masse oder einer roten Hervorhebung, wenn der Entwurf wegen der Dimensionierungsstrategie früh verworfen wurde und bis dahin nicht die Verschiebungsrestriktion erfüllt hat

Der beste bisherige Entwurf hat eine Masse von 728,2 g und ist somit um 28 % leichter geworden. In der vierten Iteration können die Heuristiken wegen der Fertigungsrestriktionen kein neues Design finden. Besonders einschränkend wirkt hier die maximale *Chamber*-Anzahl von 7, die zusätzlich zu der äußeren *Chamber* nur maximal sechs innerer Profile erlaubt, die mit der verwendeten Symmetrie schnell erreicht werden. Nun werden die Lagenaufbauheuristiken aktiviert. Diese können in drei weiteren Iterationen die Masse nochmal um 63,9 g senken, bevor in Iteration 8 keine Verbesserung mehr erreicht wird. Zuletzt erfolgt in Iteration 9 eine Formoptimierung, die das Gewicht nochmals um 15,6 g senkt. Der *Ausgangsgraph* für die Formoptimierung ist in **Abbildung 7-5** (links) dargestellt. Dort sind auch die Freiheitsgrade in der Formoptimierung markiert. So kann sich *Vertex 5* in der lokalen Y-Richtung bewegen, *Vertex 7* und *Vertex 12* ein wenig in X-Richtung und *Vertex 8* in einem schmalen Rechteck. Wegen der Symmetriebedingungen sind in der linken Hälfte des *Graphen* keine Variablen eingezeichnet. Die Variablen werden so begrenzt, dass die Fertigungsrestriktionen auch noch erfüllt werden, wenn die Variablen an ihre festgelegten Grenzen wandern (siehe Abschnitt 6.3).

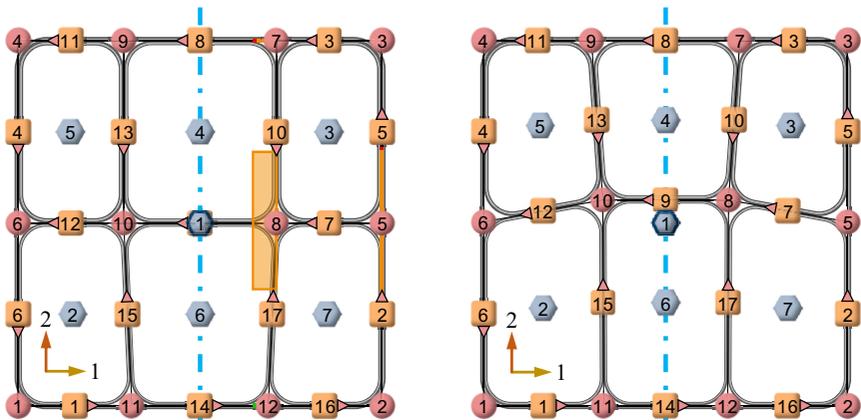


Abbildung 7-5: Ausgangsgraph vor der Formoptimierung mit eingezeichneten Variablenräumen (links) und finaler Graph nach der Formoptimierung (rechts)

In **Abbildung 7-6** ist das Deformationsverhalten des gefundenen Optimums zu Beginn der Simulation und zu zwei weiteren Zeitpunkten dargestellt. In den ersten 4 ms dringt das Fallgewicht mittig in die Profilstruktur ein und führt dort zu einer lokalen Deformation. Nachdem der Fallkörper einen ausreichenden Weg zurückgelegt hat, erhöhen die waagerechten Wände in der Mitte des Querschnitts den Deformationswiderstand und das Profil beginnt sich an den beiden Enden zu deformieren, wo dieses auf den beiden Zylindern lagert.

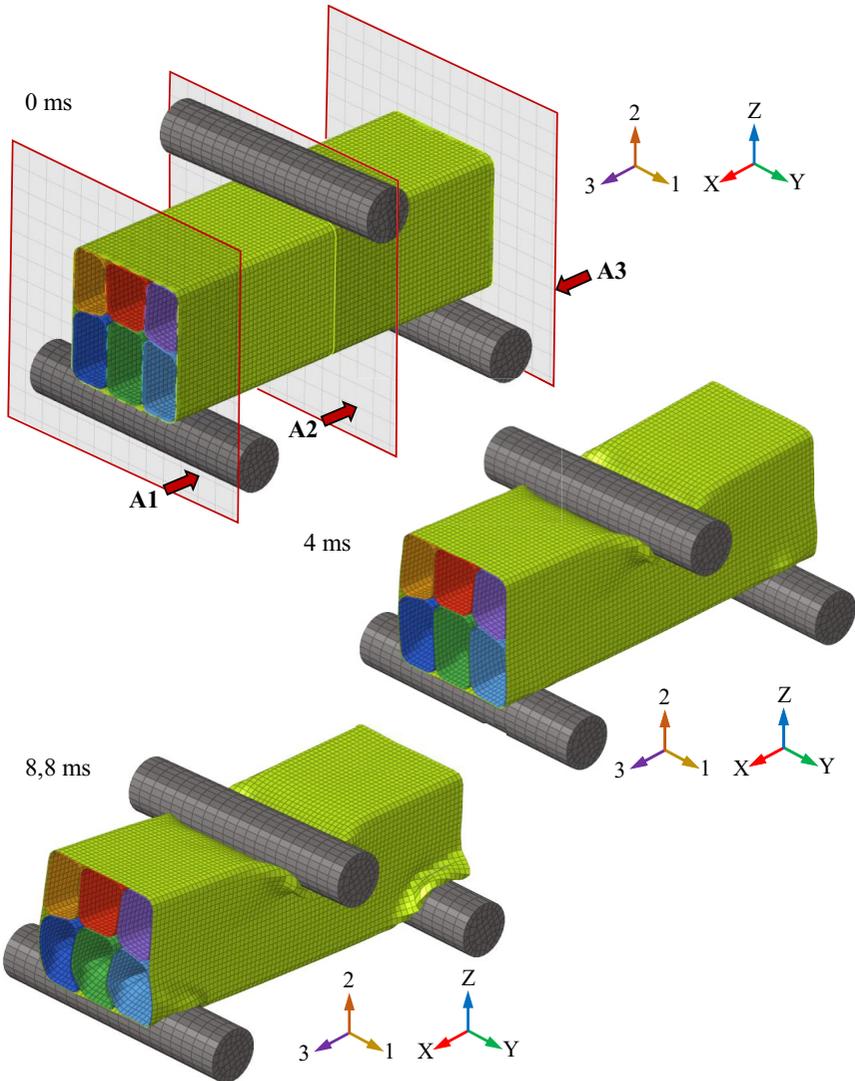


Abbildung 7-6: Deformation des Optimums der Massenminimierung des 300 mm-Profiles zu drei Zeitpunkten mit der Skizzierung der Ansichten A1, A2 und A3 im ersten Zeitpunkt

Für die Struktur hat diese Art von Deformationsverhalten den Vorteil, dass drei Bereiche der Struktur an der Energieabsorption beteiligt werden und zu jedem Zeitpunkt die strukturelle Integrität gewährleistet wird, da an den Profilenden der obere Teil der Struktur intakt bleibt und in der Profilmitte der untere Bereich. In **Abbildung 7-7** lässt sich die beschriebene Deformation mit zusätzlichen Querschnittsansichten verfolgen. Die beiden Ansichten A1 und A3 sowie die Schnittansicht A2 sind in **Abbildung 7-6** hervorgehoben. Man erkennt auch hier, dass in den ersten 4 ms der Querschnitt in der Mitte des Profils deformiert und danach die Querschnitte an den Profilenden bei den Zylindern.

In **Abbildung 7-8** zeigt sich dieses Verhalten auch im Kontaktkraftverlauf zwischen den starren Zylindern und der Profilstruktur. Die Kraft steigt hier in der ersten Millisekunde an, bis die lokale Deformation am Einschlagort nach 1 ms einsetzt und die Kraft wieder absinkt. Ab 1,8 ms steigt die Kraft wieder an, da die am Einschlagort gebildeten Falten den Deformationswiderstand erhöhen. Nach 3,5 ms wird der Deformationsfortschritt durch die horizontalen Wände in der Mitte behindert und stattdessen beginnen sich die unteren *Chambers* an den beiden Enden des Profils zu deformieren, dort wo diese auf den Zylindern aufliegen. Dadurch sinkt die Kraft ab diesem Zeitpunkt.

Bei der Betrachtung der Dicken der einzelnen Lagenorientierung in **Tabelle 7-3** in den *Chambers* (vgl. **Abbildung 7-5** für die Zuordnung der IDs) wird ersichtlich, dass der Anteil der $\pm 45^\circ$ -Lagen bei dem gefundenen Entwurf am größten ist. Dies liegt daran, dass die $\pm 45^\circ$ -Lagen sowohl gegen die lokale Deformation helfen, als auch eine Unterstützung gegen die Biegung der gesamten Profilstruktur liefern.

Tabelle 7-3: Dicke der einzelnen Orientierungen nach der Optimierung

<i>Chamber</i>	Lagendicke der Orientierungen [mm]		
	$\pm 87^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 45^\circ$
1	0,22	0,29	0,48
2	0,28	0,29	0,41
3	0,38	0,36	0,58
4	0,32	0,37	0,54
5	0,38	0,36	0,58
6	0,31	0,17	0,50
7	0,28	0,29	0,41
Ø Anteil	28 %	27 %	45 %

Insgesamt werden während der Optimierung 595 Simulationen ausgeführt und im Durchschnitt 2,3 Simulationen pro Bewertung der 119 Heuristikentwürfe ausgeführt. Die Topologieheuristiken in den frühen Iterationen haben hierbei den größten Einfluss. Die Formoptimierung mit ihren 298 Simulationen benötigt in dem Beispiel 50 % der Rechenressourcen.

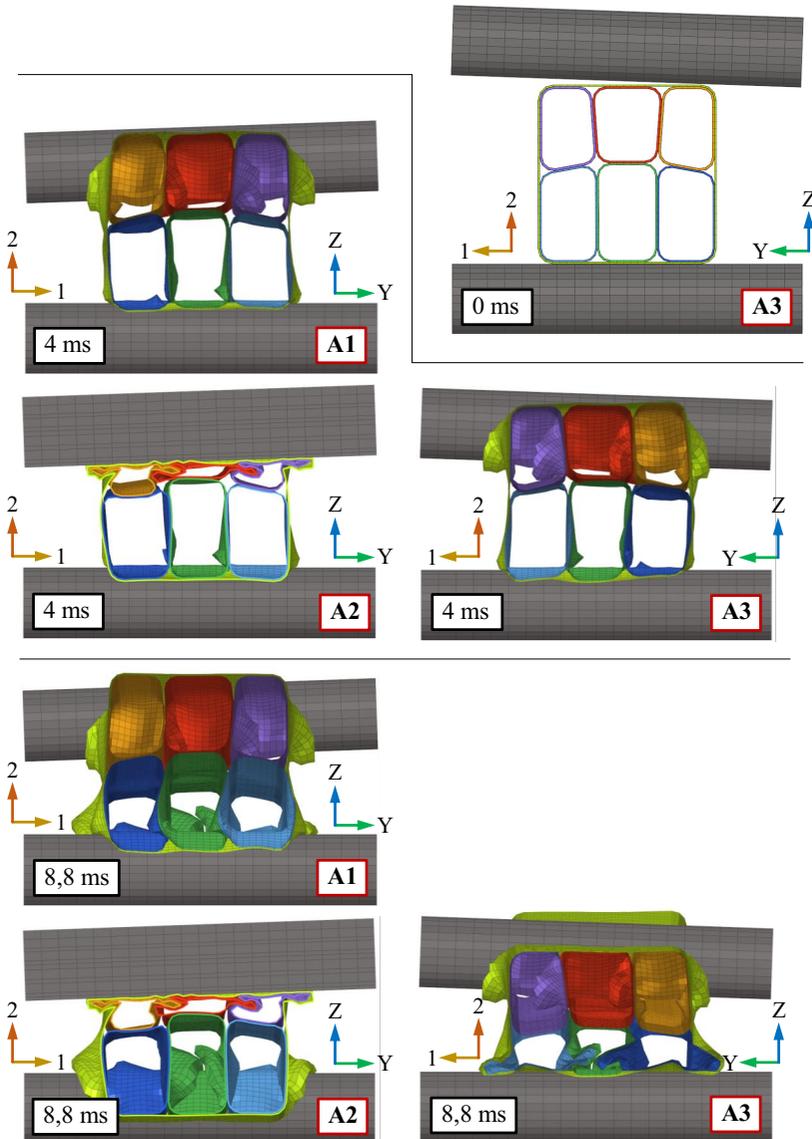


Abbildung 7-7: Deformation des Optimums der Massenminimierung des 300 mm-Profiles zu drei Zeitpunkten mit zwei Ansichten normal zur Profilachse von beiden Enden des Profils (A1 und A3) und einer Schnittansicht durch die Mitte des Profils (A2)

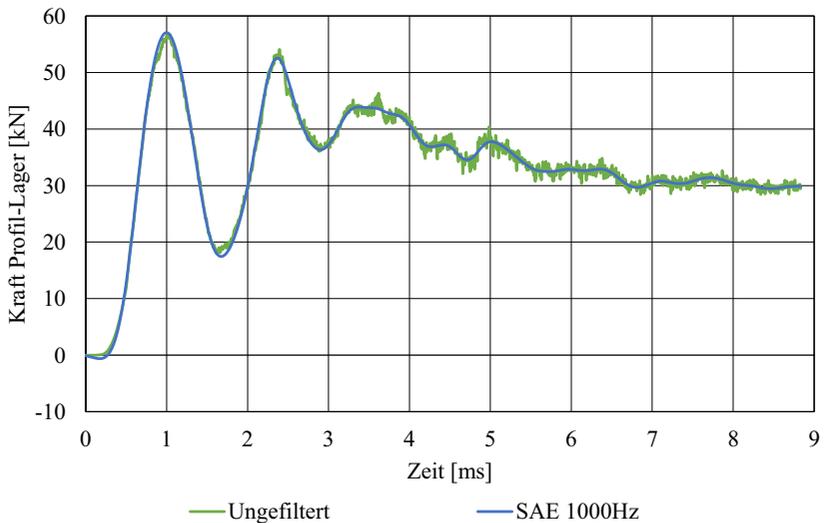


Abbildung 7-8: Kontaktkraftverlauf in Z-Richtung zwischen den starren Zylindern und der Profilstruktur, einmal ungefiltert und einmal mit einem SAE-1000Hz-Filter

Um beurteilen zu können, welchen Einfluss die Profillänge und das daraus resultierende Deformationsverhalten auf das Optimierungsergebnis hat, wird die Optimierung mit dem 100 mm- und dem 700 mm-Profil durchgeführt (siehe Abschnitt 7.1). Beim 100 mm-Profil konnte das Gewicht im Vergleich zum Startentwurf mit 228 Simulationen von 521 g auf 305 g reduziert werden (-41,4 %) und beim 700 mm-Profil in 255 Simulationen von 3,07 kg auf 1,82 kg (-40,9 %). Die beiden Optimierungshistorien sind in **Tabelle 7-4** und **Tabelle 7-5** festgehalten und die erzeugten Topologien in **Abbildung 7-9** und **Abbildung 7-10**.

Tabelle 7-4: Optimierungshistorie der Massenminimierung des 100 mm-Profiles

Iteration	Aktion	m [g]	d_z [mm]	F_z [kN]	Simulationen
0	Dimensionierung	520,8	57,5	73,1	11
1	Topologieheuristiken	416,9	59,8	93,3	9
2	Topologieheuristiken	421,5	57,4	62,8	29
3	Lagenheuristiken	320,9	57,9	74,6	79
4	Lagenheuristiken	305,3	58,9	77,3	55
5	Lagenheuristiken	315,0	59,6	76,6	34
6	Formoptimierung	311,9	58,9	79,7	11

Tabelle 7-5: Optimierungshistorie der Massenminimierung des 700 mm-Profiles

Iteration	Aktion	m [kg]	d_z [mm]	F_z [kN]	Simulationen
0	Dimensionierung	3,07	59,5	91,2	11
1	Topologieheuristiken	2,71	59,8	93,3	13
2	Topologieheuristiken	2,53	54,7	66,0	38
3	Topologieheuristiken	2,44	58,8	76,9	27
4	Topologieheuristiken	2,47	59,8	58,3	3
5	Lagenheuristiken	1,82	59,7	51,2	70
6	Lagenheuristiken	1,82	59,4	55,1	47
7	Formoptimierung	1,82	59,2	51,9	46

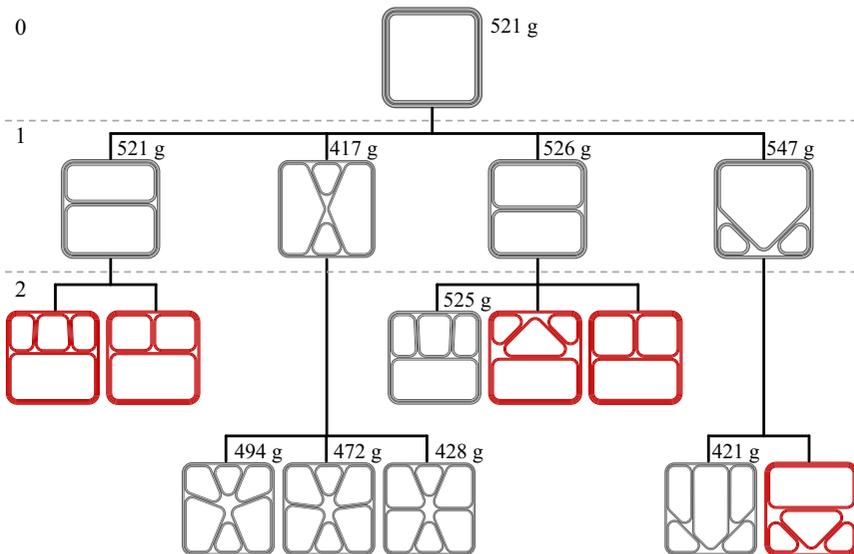


Abbildung 7-9: Historie der Querschnitte, die während der Optimierung des 100 mm-Profiles bis Iteration 2 von den Topologieheuristiken vorgeschlagen und bewertet wurden (alle gezeigten Querschnitte erfüllen die Fertigungsrestriktionen), jeweils mit Angabe der Masse oder einer roten Hervorhebung, wenn der Entwurf wegen der Dimensionierungsstrategie früh verworfen wurde und bis dahin nicht die Verschiebungsrestriktion erfüllt hat

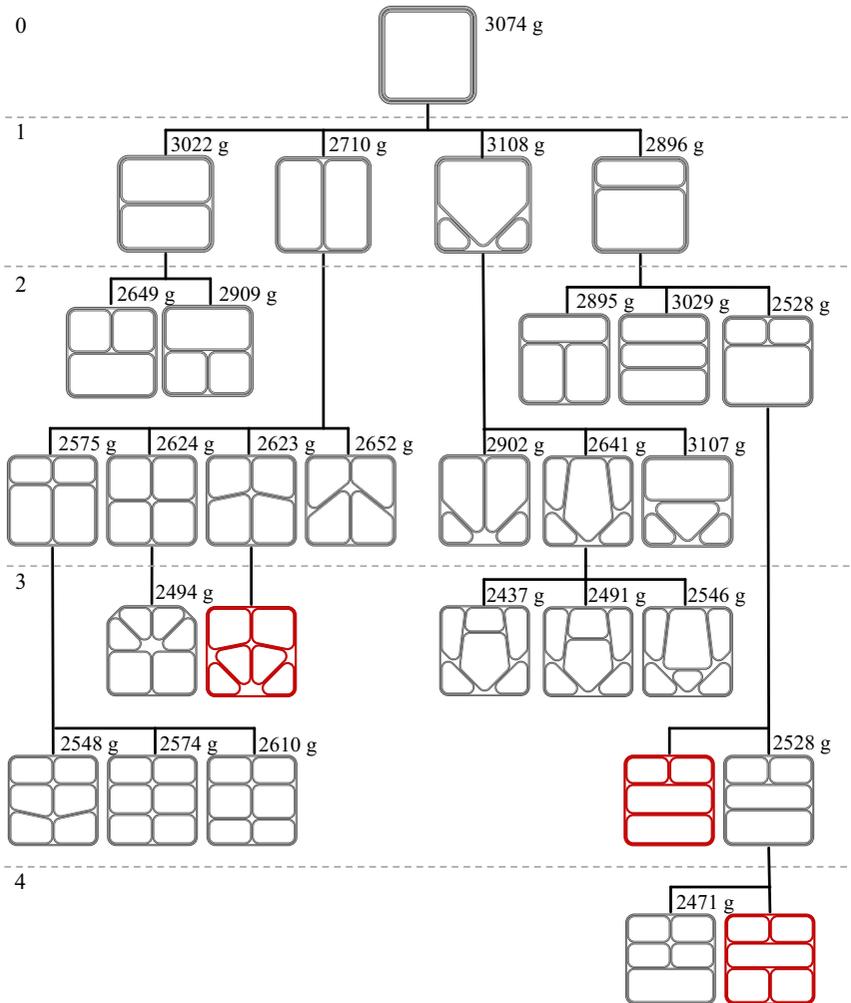


Abbildung 7-10: Historie der Querschnitte, die während der Optimierung des 700 mm-Profiles bis Iteration 4 von den Topologieheuristiken vorgeschlagen und bewertet wurden (alle gezeigten Querschnitte erfüllen die Fertigungsrestriktionen), jeweils mit Angabe der Masse oder einer roten Hervorhebung, wenn der Entwurf wegen der Dimensionierungsstrategie früh verworfen wurde und bis dahin nicht die Verschiebungsrestriktion erfüllt hat

Das Deformationsverhalten der beiden Optima zum jeweils letzten Zeitpunkt ist in **Abbildung 7-11** gezeigt. Während das 100 mm-Profil lateral zerdrückt wird, wird das 700 mm-Profil an den Kontaktstellen mit den Zylindern und dem Fallgewicht lokal deformiert und zusätzlich entlang der Profilachse gebogen. Die zugehörigen *Graphen* und die Dicken der einzelnen Orientierungen in den einzelnen *Chambers* sind in **Abbildung 7-12** und **Abbildung 7-13** festgehalten.

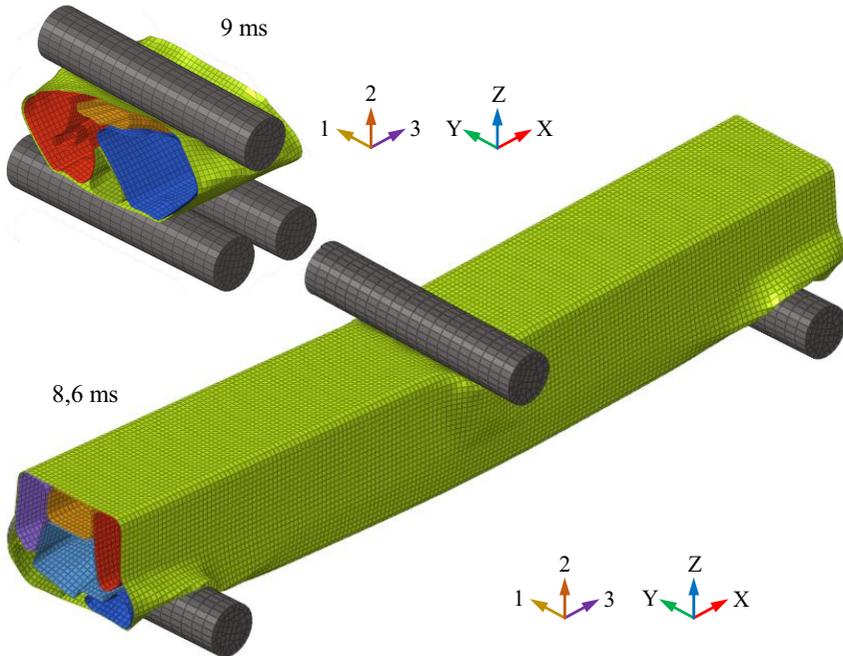


Abbildung 7-11: Deformiertes Optimum des 100 mm-Profiles bei 9 ms und des 700 mm-Profiles bei 8,6 ms

Chamber	Lagendicke der Orientierungen [mm]		
	$\pm 87^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 45^\circ$
1	0,38	0,27	0,59
2	0,85	0,42	1,17
3	0,85	0,42	1,17
4	0,47	0	0,51
5	0,54	0,34	0,66
Ø Anteil	0,36	0,17	0,47

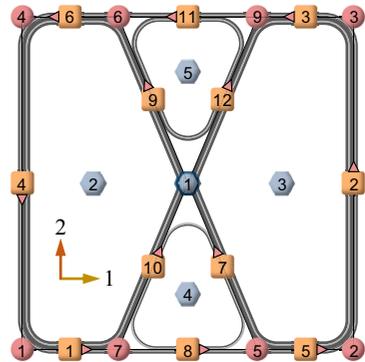


Abbildung 7-12: Anteile der Lagen in den einzelnen Chambers und zugehöriger Graph mit den Chamber-IDs des Optimums des 100 mm-Profiles

Chamber	Lagendicke der Orientierungen [mm]		
	$\pm 87^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 45^\circ$
1	0,23	0,40	0,41
2	0,27	0,39	0,43
3	0,52	0,59	0,69
4	0,27	0,39	0,43
5	0,55	0,69	0,63
6	0,52	0,59	0,69
7	0,28	0,43	0,37
Ø Anteil	27 %	36 %	37 %

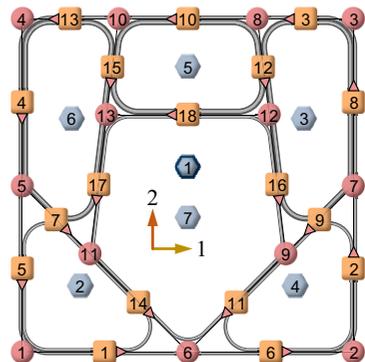


Abbildung 7-13: Anteile der Lagen in den einzelnen Chambers und zugehöriger Graph mit den Chamber-IDs des Optimums des 700 mm-Profiles

Wie in **Abbildung 7-14** visualisiert, sinkt der durchschnittliche Anteil der $\pm 87^\circ$ -Lagen mit einer zunehmenden Länge des Profils von 36 % über 28 % auf 27 %, während der Anteil der $\pm 10^\circ$ -Lagen von 17 % über 27 % auf 36 % steigt. Dies hängt mit der höher werdenden Biegebeanspruchung durch den zunehmenden Abstand der Zylinder zusammen. Hier helfen die axial verlaufenden $\pm 10^\circ$ -Lagen mit zunehmender Länge, während bei der lateralen Kompression des 100 mm-Profiles nur ein geringer Anteil an axialen Lagen nötig ist und dafür mehr Fasern in Umfangsrichtung benötigt werden. Wie sich zeigt, können die Lagenaufbauheuristiken diesem Zustand Rechnung tragen und den Lagenaufbau sinnvoll für verschiedene Profillängen anpassen.

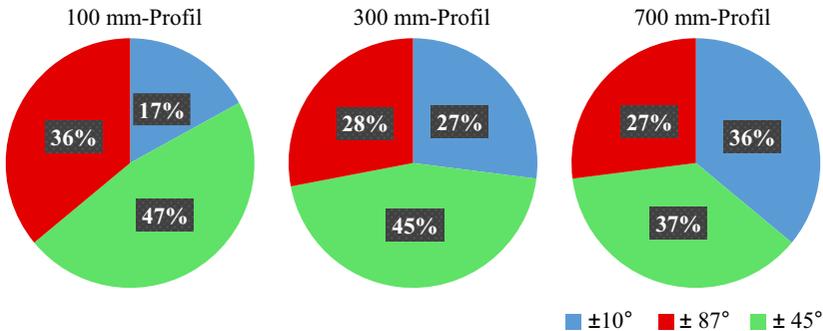


Abbildung 7-14: Kreisdiagramme mit den Anteilen der verschiedenen Faserorientierungen bei den optimierten Profilen mit einer Länge von 100 mm, 300 mm und 700 mm

7.3 Kraftminimierung mit Verschiebungsrestriktion und verschiedenen Dimensionierungsalgorithmen

Neben der Massenminimierung sind gerade bei crashrelevanten Strukturen oft auch die Kraftniveaus wichtig, unter denen die Energieabsorption stattfindet. Hier sind möglichst konstante Kraftverläufe erstrebenswert, da Kraftpeaks einerseits zu Verletzungen von Insassen führen könnten oder zu der frühzeitigen Beschädigung von Strukturelementen. Darum wird nun eine Optimierung mit dem 300 mm-Profil durchgeführt, in der die maximal auftretende Kraft zwischen der Profilstruktur und den beiden darunter positionierten starren Zylindern minimiert werden soll. Die maximal erlaubte Z-Verschiebung des Fallgewichts bleibt hierbei auf 60 mm beschränkt.

Die Kraft wird mit einem SAE1000Hz-Filter gefiltert (Alem und Perry 1995), um zeitlich sehr begrenzte Peaks zu glätten. Das Optimierungsziel und die Restriktion sind in **Tabelle 7-6** festgehalten. Die restlichen Einstellungen werden aus **Tabelle 7-1** übernommen. Um gleichzeitig den Einfluss der Dimensionierungsstrategien untersuchen zu können, wird die Optimierung insgesamt dreimal mit jeweils folgender Dimensionierungsstrategie für der Bewertung der Heuristikentwürfe ausgeführt:

- **SRSM:** Algorithmus von LS-OPT (siehe Abschnitt 6.4)
- **DS 1:** Effiziente Dimensionierungsstrategie ohne die Verwerfung schlechter Entwürfe (siehe Abschnitt 6.5)
- **DS 2:** Effiziente Dimensionierungsstrategie mit der Verwerfung schlechter Entwürfe (siehe Abschnitt 6.5.4)

Die Optimierungshistorien der drei Optimierungen sind in **Tabelle 7-7** festgehalten. Während bei **SRSM** im Schnitt 9,0 Simulationen pro Dimensionierung eines Heuristikentwurfs benötigt werden, sind es bei **DS 1** nur noch 3,0 und bei **DS 2** sogar nur 2,57. Die Maximalkraft der initialen Profilstruktur beträgt 53491 N. Die minimierten Maximalkräfte nach den drei Optimierungen bewegen sich in einem vergleichbaren Rahmen.

Tabelle 7-6: Optimierungsproblem zur Minimierung der maximalen Kontaktkraft zwischen dem Profil und den starren Zylindern unterhalb der Struktur

Eigenschaft	Wert
Ziel	Minimiere die maximale Kontaktkraft F_z zwischen dem Profil und den beiden starren Zylindern unterhalb der Struktur
Restriktion	Z-Verschiebung d_z des Fallgewichts < 60 mm

Tabelle 7-7: Optimierungshistorie für die Kraftminimierung mit drei verschiedenen Dimensionierungsstrategien

Dimensionierungsstrategie	SRSM	DS 1	DS 2
Iterationen	6	7	7
Evaluierte Heuristikvorschläge	73	74	93
Simulationen gesamt	739	304	321
Simulationen pro Dimensionierung	9,0	3,0	2,57
Min. Kraft [N]	43409	44406	43811
d_z [mm]	60,0	59,7	59,8
m [g]	867	837	841

Graph des Optimums



SRSM hat einen Entwurf mit einer Kraft von 43409 N gefunden. **DS 1** ist in diesem Fall um 2,3 % schlechter und **DS 2** um 0,9 % schlechter. **DS 1** und **DS 2** haben eine andere Querschnittstopologie gefunden, als **SRSM**. Dies liegt daran, dass für das Design *s.UT* bei dem Aufruf der Heuristik *Ausgleichen der Energiedichte* bei **SRSM**, wie in **Abbildung 7-15** dargestellt, die *Edge 3* mit der *Edge 7* verbunden wird und bei **DS 1** und **DS 2** stattdessen die

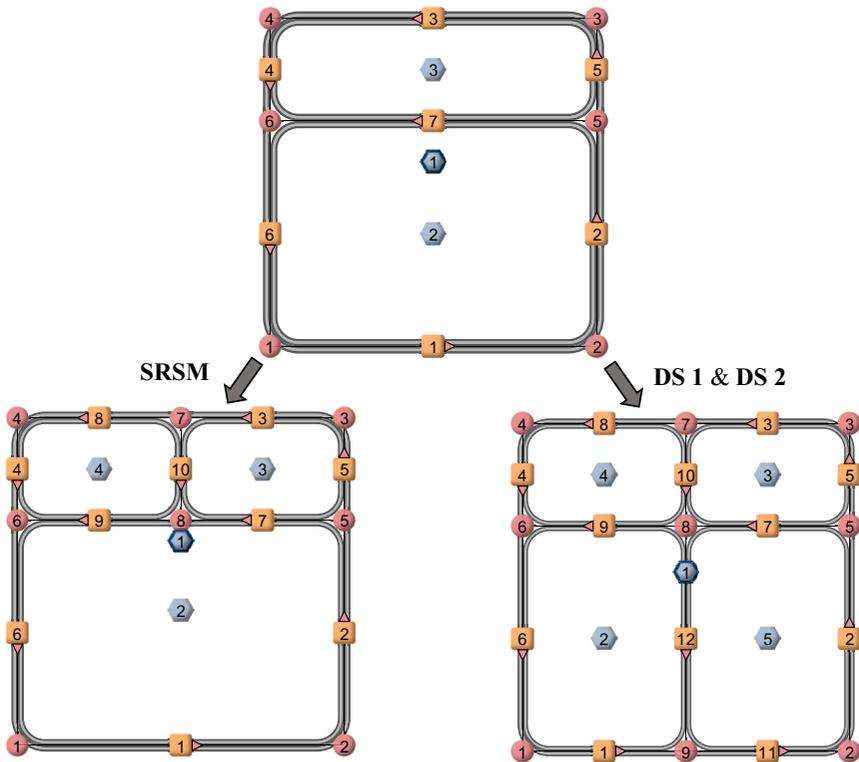


Abbildung 7-15: Unterschiedliche erzeugte Querschnittstopologien durch die Heuristik Ausgleichen der Energiedichte in den Kraftminimierungen

Edge 3 mit der *Edge 1*. Durch die verwendete Perturbation und unterschiedliche Wandstärken des Ausgangsdesigns, können die Simulationsergebnisse leicht abweichen und darum andere *Edge*-Kombinationen miteinander verbunden werden und verschiedene Optimierungspfade entstehen. Die Unterschiede hängen darum nicht mit der jeweiligen Dimensionierungsstrategie zusammen.

Aus **Abbildung 7-16** gehen der initiale Kraftverlauf sowie die drei optimierten Kraftverläufe über den Weg des Fallgewichts hervor. Da die Simulationen beendet werden, nachdem das Fallgewicht komplett gestoppt wurde, ist das Abfallen der Kurven während der Entlastung nicht in den Kurven zu sehen. Die optimierten Kraftverläufe weisen im Vergleich zum initialen Entwurf geringere Kraftschwankungen auf, haben jedoch noch keinen konstanten Kraftverlauf erreicht. Aufgrund der deutlich gesteigerten Effizienz wird der Einsatz von **DS 2** empfohlen und in den anderen Optimierungen dieser Arbeit eingesetzt. Es sei erwähnt, dass die

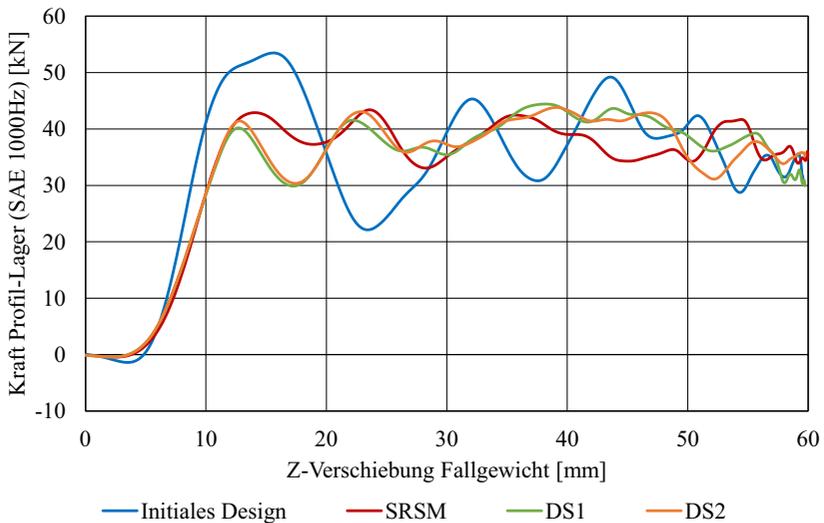


Abbildung 7-16: Kurven der Z-Kontaktkraft zwischen der Profilstruktur und den starren Zylindern, aufgetragen über der Z-Verschiebung der Fallgewichts, für das initiale Design und die drei Optima der verschiedenen Dimensionierungsstrategien

Formoptimierung bei **SRSM** nur zu einer Verbesserung von 8 N geführt hat und bei den anderen beiden Optimierungen gar keine Verbesserung erreicht, sodass die dafür jeweils nötigen 61 Simulationen in diesem Fall unnötig waren. Interessant ist ein Blick auf die Massen, die mit 837-867 g deutlich schwerer sind als die Masse des Entwurfs aus der Massenminimierung in **Tabelle 7-2** auf S. 121 mit einem Gewicht von 649 g. Dafür weist dieser Entwurf eine deutliche größere Kraft von 57060 N auf und ist unter diesem Aspekt deutlich schlechter als die Entwürfe, deren Maximalkräfte minimiert wurden. Das Optimierungsziel hat somit erwartungsgemäß einen großen Einfluss auf das gefundene Optimum.

7.4 Intrusionsminimierung mit konstanter Masse und verschiedenen Einstellungen für die Lagenaufbauheuristiken

Neben der Vermeidung von Kraftpeaks kann es auch zu der Aufgabe von crashrelevanten Strukturen gehören, Überlebensräume zu sichern oder Intrusionen in kritische Komponenten wie dem Batteriesystem zu vermeiden. Darum wird eine weitere Optimierung mit einer Intrusionsminimierung für das 300 mm-Profil durchgeführt. Da davon auszugehen ist, dass die Struktur während der Verfolgung dieses Ziels die größtmögliche Masse anstrebt, ist das Gewicht des Profils mit 1 kg während der gesamten Optimierung konstant gesetzt. Die Masse

wird über eine passende Skalierung der Wandstärken erreicht. Dieses spezielle Optimierungsproblem hat dadurch den Vorteil, dass die Heuristikentwürfe nicht in einer Dimensionierung bewertet werden müssen, sondern mit einem einzelnen Funktionsaufruf beurteilt werden können. Das Optimierungsproblem mit den geänderten Informationen ist in **Tabelle 7-8** festgehalten.

Tabelle 7-8: Optimierungsproblem zur Intrusionsminimierung des Mehrkammerprofils

Eigenschaft	Wert
Ziel	Minimiere die Z-Verschiebung d_z des Fallgewichts
Restriktion	die Masse m des FKV-Profiles beträgt 1kg
Variable	In finaler Iteration Formvariablen, bei Heuristikbewertungen nur einzelner Funktionsaufruf.

Neben dem speziellen Optimierungsproblem wird in insgesamt drei Optimierungen untersucht, wie verschiedene Einstellungen der Lagenaufbauheuristiken das Optimierungsergebnis beeinflussen:

- A: Die Lagenaufbauheuristiken ändern die Dicke einer Lage um maximal 10 % der durchschnittlichen Dicke der *Chambers* und *Edges*, gerundet auf ein Vielfaches der angegebenen Tapedicke (hier ergibt sich 0,13 mm oder 0,26 mm).
- B: Die Lagenaufbauheuristiken ändern die Dicke einer Lage maximal um die in der Konfigurationsdatei angegebene Tapedicke (hier ergibt sich 0,13 mm).
- C: Die Lagenaufbauheuristiken ändern die Dicke einer Lage wie in A maximal um 10 % der durchschnittlichen Dicke in dem *Graphen* gerundet auf ein Vielfaches der Tapedicke. Diese Änderung wird jedoch nur an der Lage mit dem größten durch die Heuristik ermittelten Kennwert vorgenommen und nicht an allen Lagen. Dies betrifft die Heuristiken *Aufdicken energiereicher Lagen*, *Entfernen unbelasteter Lagen* und *Anpassung der Lagenanteile*. Diese Option wird in den bereits vorgestellten Optimierungen verwendet und in der Konfigurationsdatei über den Eintrag `allMultTopMod false` angesteuert.

Die detaillierte Optimierungshistorie ist in **Tabelle 7-9** festgehalten. Da nur die Einstellungen für die Lagenaufbauheuristiken verändert werden, sind die Iterationen 1-4 mit den Topologieheuristiken in allen drei Optimierungen übernommen worden. Zwischen Optimierung A und B liegt kein qualitativer Unterschied vor. Dies liegt daran, dass auch bei Optimierung A bei den meisten Aktivierungen der Lagenheuristiken die maximale Dickenänderung einer Lage auf 0,13 mm beschränkt ist. Auch mit der Erfahrung von weiteren Optimierungen zeigt sich, dass durch die Beschränkung der maximalen Dickenänderung auf die Tapedicke, ge-

ringförmig mehr Iterationen benötigt werden und etwas bessere Designs gefunden werden können. In der Optimierung C, in der immer nur eine Lage bei den meisten Lagenaufbauheuristiken angepasst wird, ist der Unterschied deutlicher ausgeprägt. Die Verbesserungen in den einzelnen Iterationen fallen hier geringer aus, sodass in Iteration 5 und 6 schlechtere Designs als bei den anderen beiden Optimierungen gefunden werden, dafür können in dieser Optimierung auch noch in den folgenden Iterationen Verbesserungen erreicht werden, sodass insgesamt ein besseres Design gefunden wird, das eine um 1,9 mm geringere Intrusion aufweist. Dies ist darin begründet, dass die Lagenaufbauheuristiken den *Graphen* insgesamt weniger ändern, dafür aber gezielter einzelne Lagen anpassen und durch die detaillierteren Modifikationen über mehr Iterationen größere Verbesserungen erreichen können.

Tabelle 7-9: Historie der drei Optimierungen mit den abweichenden Einstellungen für die Lagenaufbauheuristiken

Iteration	A		B		C	
	d_z [mm]	F_z [kN]	d_z [mm]	F_z [kN]	d_z [mm]	F_z [kN]
0	58,2	52,8	58,2	52,8	58,2	52,8
1	49,3	79,4	49,3	79,4	49,3	79,4
2	44,4	71,1	44,4	71,1	44,4	71,1
3	44,4	64,5	44,4	64,5	44,4	64,5
4	46,0	72,2	46,0	72,2	46,0	72,2
5	40,1	79,2	39,9	78,6	42,0	79,5
6	36,9	85,7	37,1	82,3	38,6	85,4
7	37,5	82,3	37,3	81,1	36,9	87,9
8	37,4	83,6	36,8	87,7	36,3	86,4
9					35,3	88,6
10					35,1	88,5
11					34,9	88,3
12					35,1	85,1
13					34,9	87,3
	∑ 249 Simulationen Davon 151 für Formopt.		∑ 134 Simulationen Davon 31 für Formopt.		∑ 381 Simulationen Davon 181 für Formopt.	

Die Einstellungen von Optimierung C werden darum empfohlen, wenn die entsprechenden Funktionsaufrufe zur Verfügung stehen. Wenn die Rechenressourcen begrenzt sind, kann auch auf die Einstellungen von Optimierung A und B zurückgegriffen werden, mit unter Umständen geringfügig schlechteren gefundenen Entwürfen.

In **Abbildung 7-17** sind die besten *Graphen* aus jeder Iteration von Optimierung C in ein Diagramm eingetragen, das die erzielten Intrusionen aller Designs der Optimierung über die zugehörige Iteration plottet. Da ab Iteration 5 die Lagenaufbauheuristiken aktiv sind und sich

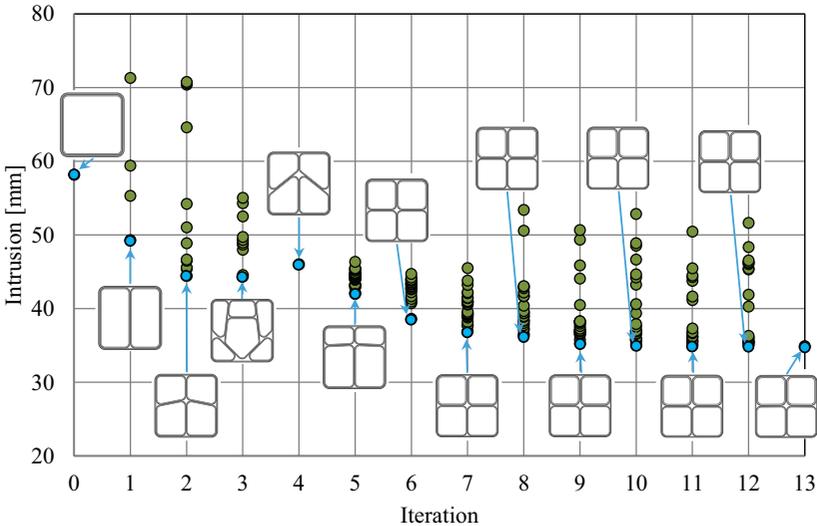


Abbildung 7-17: Die besten Graphen jeder Iteration aus der Optimierung C, eingetragen in ein Diagramm, das für alle Designs die Ingression über die Iteration plottet

ab Iteration 6 eine Querschnittsgeometrie durchgesetzt hat, sehen die Visualisierungen der *Graphen* nahezu identisch aus. Das Diagramm zeigt auch nochmal auf, dass viele Designs keine Verbesserung erzielen und schlechter sind, als das beste Design der vorherigen Iteration. Erst durch die Arbeit mit den konkurrierenden Entwürfen, können die Verbesserungen über viele Iterationen erreicht werden. Es wird auch ersichtlich, dass die Verbesserungsrate, wie zu erwarten, mit höheren Iterationen abnimmt, da die Entwürfe dann schon näher am Optimum sind und das mögliche Verbesserungspotential immer niedriger ausfällt.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit stellt vor, wie crashbelastete Mehrkammerfaserverbundprofile optimiert werden können. Das angestrebte Fertigungsverfahren ist das Tapewickelfverfahren, in dem die Matrix eines thermoplastischen, faserverstärkten Tapes durch eine Erwärmung lokal aufgeschmolzen wird und unter einem einstellbaren Anpressdruck auf einem rotierenden Kern abgelegt wird. Durch einen Vorschub in Richtung der Profillachse kann das Tape mit verschiedenen Orientierungen gewickelt werden. Um komplexere Querschnittstopologien zu erlauben, können mehrere gewickelte Profile miteinander verklebt werden und dieser Verbund im Anschluss mit zusätzlichen Lagen von außen umwickelt werden. Um die Profilstrukturen innerhalb der Optimierungsmethodik zu beschreiben, wird ein mathematischer *Graph* verwendet, der die Lage des Profils, die Geometrie des Querschnitts sowie den Lagenaufbau aller Profile beschreibt. Der *Graph* hat den Vorteil, dass er leicht modifiziert werden kann und über Schnittstellen zu einem Präprozessor automatisiert in ein Finite Elemente Modell überführt werden kann. Außerdem ermöglicht der *Graph* die Überprüfung verschiedener Fertigungsrestriktion, die z. B. die Mindestgröße und Form der Profile überprüfen, wie auch die angestrebten Orientierungen im Lagenaufbau. Die Finiten Elemente Modelle werden basierend auf den *Graphen* für den Solver LS-DYNA von Grund auf automatisiert neu erzeugt. Dadurch kann eine sehr gute Netzqualität ohne verzerrte Finite Elemente gewährleistet werden. Der Profilverbund wird mit Schalenelementen modelliert und kann in ein bereits vorhandenes Inputdeck eingebunden werden, in dem unter anderem der Lastfall und die Materialien definiert sein müssen. Benachbarte Profile werden mit *Tiebreak*-Kontakten verbunden und der Lagenaufbau jeweils mit einem `*PART_COMPOSITE` definiert, in dem jede Lage einem Integrationspunkt über die Dicke der Schalenelemente entspricht. Um Delamination abzubilden, kann ein Lagenaufbau, falls gewünscht, in mehrere Schalenelementschichten aufgeteilt werden, die über Volumenklebeelemente oder *Tiebreak*-Kontakte miteinander verbunden sind.

Um die Querschnittstopologie und den Lagenaufbau zu optimieren, werden Heuristiken eingesetzt. Diese Heuristiken versuchen Expertenwissen in Algorithmen zu überführen, die die Ergebnisse einer Finite Elemente Simulation automatisiert auswerten und basierend auf ermittelten Kennwerten eine Änderung der Topologie oder des Lagenaufbaus vorschlagen. Die Heuristiken streben hierbei eine Verbesserung des Strukturverhaltens an. Nicht immer müssen diese Änderungen zu einer Verbesserung führen. Durch die konkurrierende Aktivierung der Heuristiken während der Optimierung, werden jedoch mehrere Designs erzeugt, sodass es nicht kritisch ist, wenn eine Heuristik zu einem bestimmten Zeitpunkt keine Verbesserung erzielt. Die Heuristiken können für verschiedene Optimierungsprobleme eingesetzt werden. Da sie z. B. ein gutmütiges Deformationsverhalten oder eine über die Struktur gleichmäßig verteilte Energieabsorption anstreben, verbessern sie das allgemeine Crashverhalten, was wiederum in vielen Fällen auch zu einer Verbesserung der Zielfunktion oder der Verringerung der Restriktionsverletzung führt.

Um die Deformation des gesamten Profils auswerten zu können und nicht nur die Verformung einzelner Analyseebenen an bestimmten Stellen des Querschnitts, werden die Simulationsdaten in ein regelmäßiges Raster aufgeteilt, dessen Daten in einer mehrdimensionalen Matrix gespeichert werden und dadurch sehr effizient durch Algorithmen ausgewertet werden können. Das Raster erleichtert auch die Auswertung, wenn ein Lagenaufbau mit mehreren Schalelementlagen modelliert wird und die Deformation des Verbunds ausgewertet werden soll. Der Optimierungsablauf in der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung besteht aus zwei verschachtelten Optimierungsschleifen. In der äußeren Schleife schlagen die Heuristiken für eine vorgegebene Anzahl der besten Designs der vorherigen Iteration, basierend auf deren Simulationsdaten, neue abgewandelte Entwürfe vor. Jedes dieser Designs wird in einer inneren Optimierungsschleife in einer ressourcenarmen Dimensionierung mit wenigen Funktionsaufrufen bewertet. Eine Skalierung der Dicken ermöglicht hier eine Justierung auf das Optimierungsproblem, nachdem durch die Heuristiken eine Topologie- oder Lagenaufbauänderung induziert wird und sich z. B. die Steifigkeit dadurch zu stark erhöht oder reduziert. In einigen Problemstellungen, in denen eine erlaubte Masse immer ausgereizt wird, reicht auch ein einzelner Funktionsaufruf mit diesem zulässigen Gewicht für die Bewertung aus.

Eine Optimierung startet in der Regel mit einem leeren Profil, das mit einem einzelnen Funktionsaufruf oder einer Dimensionierung bewertet wird. In den folgenden Iterationen werden die Topologieheuristiken aktiviert, bis diese keine Verbesserung mehr erzielen können. Danach werden die Lagenaufbauheuristiken aktiviert, bis auch diese keine Verbesserung mehr erreichen können. Die beiden Gruppen von Heuristiken werden nacheinander aktiviert, da die Topologieheuristiken besonders in den frühen Iterationen einen größeren Einfluss haben und die Lagenaufbauheuristiken zu diesem Zeitpunkt noch nicht konkurrenzfähig sind. Am Ende der Optimierung kann in einer finalen Iteration optional noch eine Formoptimierung mit dem bisher besten Design ausgeführt werden.

Für die Dimensionierungen mit einer Designvariablen wurde eine effiziente Dimensionierungsstrategie entwickelt und vorgestellt, die die während der Optimierung bereits erfolgten Dimensionierungen analysiert und dazu verwendet, die Metamodelle in den weiteren Dimensionierungen vorauszusagen. Außerdem wird die Beurteilung von Designs frühzeitig gestoppt, wenn diese absehbar schlechter sind als die bereits gefundenen Entwürfe. So kann die Anzahl der nötigen Funktionsaufrufe in den Heuristikbewertungen in den gezeigten Beispielen um 83,9-88,7 % reduziert werden.

Anhand eines Mehrkammerprofils, das auf zwei starren Zylindern ruht und lateral von einem Fallgewicht getroffen wird, wird die Optimierungsmethodik vorgestellt. Als Zielfunktionen werden einzeln die Minimierung der Masse, der Intrusion und einer maximalen Kontaktkraft betrachtet. Im Vergleich zum initialen Design ohne innere Profilstrukturen konnten für das erste Ziel die Massen bei drei verschiedenen langen Profilen um 35,9-41,5 % gesenkt werden. Die Lagenaufbauten weisen mit zunehmender Länge des Profilverbunds größere Anteile an

Lagen in Richtung der Profilachse auf und reduzierte Anteile der Lagen in Umfangsrichtung. Dies hängt mit der größer werdenden Biegebeanspruchung zusammen. Bei den Minimierungen der Maximalkraft konnte die Kraft um 17,0-18,8 % im Vergleich zum Ausgangsdesign gesenkt werden. Durch die effiziente Dimensionierungsstrategie kann die durchschnittliche Anzahl an Funktionsaufrufen hierbei pro Designbewertung um 71,4 % gesenkt werden. Im Vergleich zu dem Entwurf der Massenminimierung konnte die Kraft um 23,9 % reduziert werden, jedoch mit einer um 29,0-33,6 % größeren Masse, sodass deutlich wird, dass die verschiedenen Optimierungsprobleme zu deutlich abweichenden Entwürfen führen. Zuletzt könnten bei den Intrusionsminimierungen mit verschiedenen Einstellungen der Lagenaufbauheuristiken und einer konstant gehaltenen Profilmasse von 1 kg, Reduktionen der Fallgewichtsverschiebung von 36,6-40,0 % erreicht werden.

Die gefunden Strukturen scheinen plausibel. Ein Abgleich mit anderen Optimierungsmethoden hat nicht stattgefunden, da keine weitere Methodik bekannt ist, die für die Optimierung von crashbelasteten Mehrkammerwickelstrukturen mit faserverstärkten Kunststoffen eingesetzt werden kann.

Zusammengefasst wurde die Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung in dieser Arbeit um folgende Hauptaspekte erweitert, um eine automatisierte und kombinierte Optimierung der Topologie, der Form und des Lagenaufbaus von crashbelasteten, mit Tape gewickelten, Mehrkammerprofilen aus Faserkunststoffverbunden zu ermöglichen:

- Graphenbeschreibung für Lagenaufbau und verrundete Wickelprofile
- Automatische Erzeugung mehrschaliger Finite Elemente Modelle für Wickelprofile
- Fertigungsrestriktion für den Lagenaufbau und die Querschnittsgeometrie der Wickelprofile mit Symmetriebedingungen
- Auswertung der Simulationsdaten der mehrlagigen Strukturen in einem Analyseraster
- Anpassung der Topologieheuristiken, um die gesamte Profildeformation auszuwerten
- Entwicklung von Heuristiken zur Verbesserung des Lagenaufbaus
- Entwicklung einer effizienten Dimensionierungsstrategie, um die Anzahl benötigter Funktionsaufrufe deutlich zu reduzieren

Um beurteilen zu können, wie gut die durch die Methodik gefunden Optima sind, kann als Ausblick ein Vergleich mit händisch ausgelegten Designs sinnvoll sein. Es ist theoretisch möglich, dass in dem Prozess gleiche oder sogar bessere Entwürfe gefunden werden, der damit verbundene Aufwand für die Auslegung, Berechnung und Auswertung ist jedoch immens und nur selten leistbar. Der hohe Grad der Automatisierung der Optimierung ist somit bereits ein erheblicher Vorteil der Methodik. Weiter untersucht werden könnte auch die Aktivierung der Heuristiken. Anstatt wie bisher die Lagenaufbauheuristiken nach den Topologieheuristiken zu aktivieren, wäre es denkbar, von Iteration zu Iteration zwischen den beiden Gruppen der Heuristiken zu wechseln, sodass intensivere Wechselwirkungen zwischen der Topologie und dem Lagenaufbau möglich werden. Auch sind Heuristiken möglich, die einzelnen Lagen

ein anderes Material zuweisen, wie Glas- oder Aramidfaserverstärkte Tapes. Es ist auch denkbar, Hybridmaterialien einzusetzen und Metalle und FKV zu kombinieren. So könnten Wickelkerne aus Aluminium verwendet werden und nach dem Wickelverfahren in der Struktur verbleiben. Bouchet et al. (2000) haben solche Hybridrohre in axialen Crashtests untersucht. Bei einem modifizierten Herstellverfahren könnten außerdem Materialien wie ein Kernlagenfließ/-tape durch Heuristiken z. B. in Lagenaufbauten mit einer hohen Biegebeanspruchung integriert werden.

Auch wenn die derzeit in den Optimierungen gefundenen Entwürfe nahezu ohne Anpassungen hergestellt werden können, ist es noch nötig, die ermittelten kontinuierlichen Lagendicken so anzupassen, dass diese einem Vielfachen der Tapedicke entsprechen. Dieser Prozess könnte künftig noch innerhalb des Programms automatisiert werden.

Interessant sind auch die Herstellung und Testung der gefundenen Optima, um einerseits die Simulationsmethodik weiter zu validieren und andererseits durch die Auswertung des Strukturverhaltens ggf. Schwachstellen zu identifizieren, denen mit neuen Heuristikansätzen begegnet werden kann. Im Rahmen des DFG-Projekts wurde ein Demonstrator hergestellt und getestet, dessen Geometrie und Lagenaufbau mit einem frühen Stand der Optimierungsmethode und vorläufigen Materialkennwerten erzeugt wurden. In **Abbildung 8-1** ist der *Graph*, das abgeleitete FE-Modell und das bei der Firma AFPT gewickelte und vom IVW verklebte Mehrkammerprofil zu sehen.

Neben dem Tapewickelverfahren kann künftig noch ein Fokus auf die Pultrusion als Fertigungsverfahren gelegt werden, welche einen größeren Durchsatz und durch den Wegfall der Klebungen weniger Prozessschritte erfordert. Zusätzlich sind bei der Pultrusion andere Fertigungsrestriktionen relevant, die im Vergleich zum Tapewickeln mehr Designfreiheiten erlauben können.

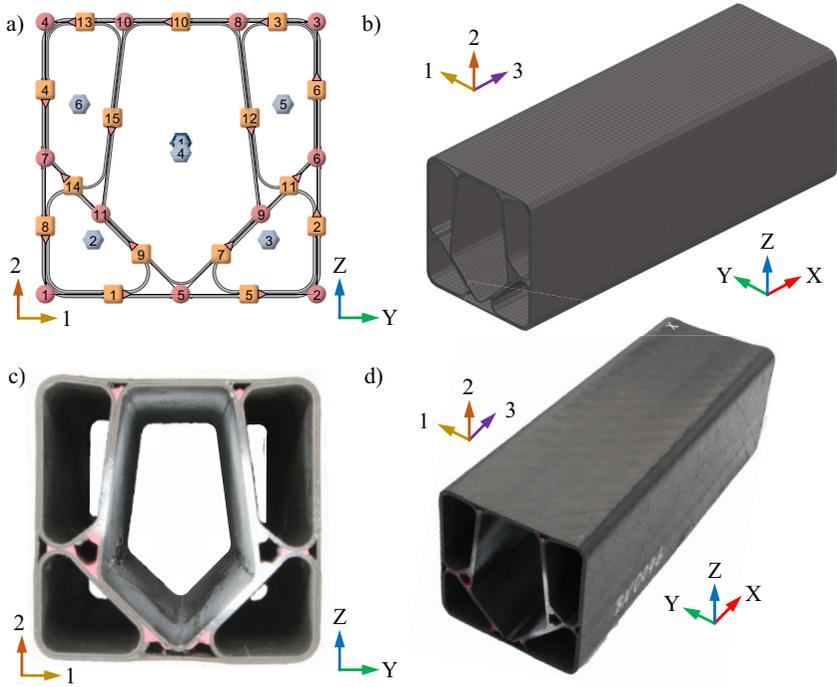


Abbildung 8-1: Graph (a) und abgeleitetes FE-Modell (b) des im DFG-Projekt gewickelten und verklebten Mehrkammer-Demonstrators in zwei verschiedenen Ansichten (c) (d)

Literaturverzeichnis

- Abdewi, Elfetori F.; Sulaiman, Shamsuddeen; Hamouda, Abdel Magid S.; Mahdi, Elsadig (2008): Quasi-static axial and lateral crushing of radial corrugated composite tubes. In: *Thin-Walled Structures* 46 (3), S. 320–332. DOI: 10.1016/j.tws.2007.07.018.
- Alem, Nabih; Perry, Matthew (1995): Design of digital low-pass filters for time-domain recursive filtering of impact acceleration signals. Hg. v. United States Army Aeromedical Research Laboratory.
- Aulig, Nikola; Menzel, Stefan; Nutwell, Emily; Detwiler, Duane (2015): Towards multi-objective topology optimization of structures subject to crash and static load cases. In: Hélder C. Rodrigues, José Herskovits, Christóvão M. Mota Soares, José Miranda Guedes, Aurelio L. Araújo, João O. Folgado et al. (Hg.): Engineering optimization IV. Proceedings of the International Conference on Engineering Optimization (ENGOPT 2014), Lisbon, Portugal, 8-11 September 2014. Boca Raton, London, New York, Leiden: CRC Press, S. 847–852.
- Belingardi, G.; Boria, S.; Obradovic, J. (2013a): Energy Absorbing Sacrificial Structures Made of Composite Materials for Vehicle Crash Design. In: Serge Abrate, Bruno Castanié und Yapa D. S. Rajapakse (Hg.): Dynamic Failure of Composite and Sandwich Structures, Bd. 192. Dordrecht: Springer Netherlands (Solid Mechanics and Its Applications), S. 577–609.
- Belingardi, Giovanni; Beyene, Alem Tekalign; Koricho, Ermias Gebrekidan (2013b): Geometrical optimization of bumper beam profile made of pultruded composite by numerical simulation. In: *Composite Structures* 102, S. 217–225. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.02.013.
- Bendsøe, Martin Philip; Sigmund, Ole (2003): Topology optimization. Theory, methods and applications. Berlin: Springer.
- Beyer, Florian; Schneider, Dominik; Schumacher, Axel (2021): Finding three-dimensional layouts for crashworthiness load cases using the graph and heuristic based topology optimization. In: *Struct Multidisc Optim* 63 (1), S. 59–73. DOI: 10.1007/s00158-020-02768-0.
- Bouchet, J.; Jacquelin, E.; Hamelin, P. (2000): Static and dynamic behavior of combined composite aluminium tube for automotive applications. In: *Composites Science and Technology* 60 (10), S. 1891–1900. DOI: 10.1016/S0266-3538(00)00058-0.
- Charoenphan, Saiphon; Bank, Lawrence C.; Plesha, Michael E. (2004): Progressive tearing failure in pultruded composite material tubes. In: *Composite Structures* 63 (1), S. 45–52. DOI: 10.1016/S0263-8223(03)00130-2.
- Ciampaglia, A.; Fiumarella, D.; Boursier Niutta, C.; Ciardiello, R.; Belingardi, G. (2021): Impact response of an origami-shaped composite crash box: Experimental analysis

- and numerical optimization. In: *Composite Structures* 256, S. 113093. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113093.
- Davoodi, M. M.; Sapuan, S. M.; Ahmad, D.; Aidi, A.; Khalina, A.; Jonoobi, Mehdi (2011): Concept selection of car bumper beam with developed hybrid bio-composite material. In: *Materials & Design* 32 (10), S. 4857–4865. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.06.011.
- Davoodi, M. M.; Sapuan, S. M.; Ahmad, D.; Ali, Aidi; Khalina, A.; Jonoobi, Mehdi (2010): Mechanical properties of hybrid kenaf/glass reinforced epoxy composite for passenger car bumper beam. In: *Materials & Design* 31 (10), S. 4927–4932. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.05.021.
- Donhauser, Tobias (2020): Beitrag zur Auslegung hochbeanspruchter Bauteile aus Faser-Thermoplast-Verbunden. Dissertation. Technische Universität Kaiserslautern, IVW-Verlag. Online verfügbar unter <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:386-kluedo-60831>.
- Donhauser, Tobias; Kenf, Andreas; Schmeer, Sebastian; Hausmann, Joachim (2022): Calculation of highly stressed components made of carbonfiber-reinforced polyamide-6. In: *Composite Structures* 280, S. 114830. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114830.
- Duan, Shuyong; Tao, Yourui; Han, Xu; Yang, Xujing; Hou, Shujuan; Hu, Zhangping (2014): Investigation on structure optimization of crashworthiness of fiber reinforced polymers materials. In: *Composites Part B: Engineering* 60, S. 471–478. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.12.062.
- Duddeck, Fabian; Hunkeler, Stephan; Lozano, Pablo; Wehrle, Erich; Zeng, Duo (2016): Topology optimization for crashworthiness of thin-walled structures under axial impact using hybrid cellular automata. In: *Struct Multidisc Optim* 54 (3), S. 415–428. DOI: 10.1007/s00158-016-1445-y.
- Duddeck, Fabian; Volz, Karlheinz Holger (2012): A new Topology Optimization Approach for Crashworthiness of Passenger Vehicles Based on Physically Defined Equivalent Static Loads. Int. Crashworthiness Conf. (ICrash), Milano, Italy.
- Fair, Walt (2008): An Algorithm for Weighted Linear Regression. Online verfügbar unter <https://www.codeproject.com/Articles/25335/An-Algorithm-for-Weighted-Linear-Regression>, zuletzt aktualisiert am 17.04.2008, zuletzt geprüft am 17.03.2022.
- Fang, Jianguang; Sun, Guangyong; Qiu, Na; Kim, Nam H.; Li, Qing (2017): On design optimization for structural crashworthiness and its state of the art. In: *Struct Multidisc Optim* 55 (3), S. 1091–1119. DOI: 10.1007/s00158-016-1579-y.
- Ferreira, Rafael T.L.; Rodrigues, Helder C.; Guedes, José M.; Hernandez, José A. (2014): Hierarchical optimization of laminated fiber reinforced composites. In: *Composite Structures* 107, S. 246–259. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.07.051.
- Fleury, C. (1989a): CONLIN: An efficient dual optimizer based on convex approximation concepts. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 1 (2), S. 81–89. DOI: 10.1007/BF01637664.

- Fleury, C. (1989b): First and second order convex approximation strategies in structural optimization. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 1 (1), S. 3–10. DOI: 10.1007/BF01743804.
- Friedrich, K. (2016): Carbon fiber reinforced thermoplastic composites for future automotive applications. In: *AIP Conference Proceedings* (1736), S. 20001. DOI: 10.1063/1.4949575.
- Hallal, Ali; Elmarakbi, Ahmed; Shaito, Ali; El-Hage, Hicham (2014): Overview of Composite Materials and their Automotive Applications. In: Ahmed Elmarakbi (Hg.): *Advanced composite materials for automotive applications. Structural integrity and crashworthiness*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons (Automotive series), S. 1–28.
- Hamada, H.; Coppola, J. C.; Hull, D.; Maekawa, Z.; Sato, H. (1992): Comparison of energy absorption of carbon/epoxy and carbon/PEEK composite tubes. In: *Composites* 23 (4), S. 245–252. DOI: 10.1016/0010-4361(92)90184-V.
- Hosseinzadeh, Ramin; Shokrieh, Mahmood M.; Lessard, Larry B. (2004): Parametric study of automotive composite bumper beams subjected to low-velocity impacts. In: *Composite Structures*, S. 419–427. DOI: 10.1016/S0263-8223(04)00099-6.
- Huang, Xiaodong; Xie, Yi Min; Lu, Guoxing (2007): Topology optimization of energy-absorbing structures. In: *International Journal of Crashworthiness* 12 (6), S. 663–675. DOI: 10.1080/13588260701497862.
- Hull, D. (1991): A unified approach to progressive crushing of fibre-reinforced composite tubes. In: *Composites Science and Technology* 40 (4), S. 377–421. DOI: 10.1016/0266-3538(91)90031-J.
- Hunkeler, Stephan (2014): *Topology Optimisation in Crashworthiness Design via Hybrid Cellular Automata for Thin Walled Structures*. Dissertation. Queen Mary University of London, London.
- Hunkeler, Stephan; Duddeck, Fabian; Rayamajhi, Mila (2013): Topology optimisation method for crashworthiness design using Hybrid Cellular Automata and thin-walled ground structures. 9th European LS-DYNA Conference, Manchester.
- Ivarsson, Niklas; Wallin, Mathias; Tortorelli, Daniel (2018): Topology optimization of finite strain viscoplastic systems under transient loads. In: *Int J Numer Methods Eng* 114 (13), S. 1351–1367. DOI: 10.1002/nme.5789.
- Janapala, Nageswara R.; Wu, Zhanjun; Chang, Fu-Kuo; Goldberg, Robert K. (2008): Lateral Crashing of Tri-Axially Braided Composite Tubes. In: *Proceedings of Earth and Space Conference, ASCE*, S. 1–12.
- Kennedy, James; Eberhart, Russell (1995): Particle swarm optimization. In: *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks* (4), S. 1942–1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- Kölzer, Patrick (2008): *Temperaturerfassungssystem und Prozessregelung des laserunterstützten Wickelns und Tapelegens von endlos faserverstärkten thermoplastischen*

- Verbundkunststoffen. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss, 2008. Aachen: Shaker (Berichte aus der Produktionstechnik, 2008,15).
- Link, Simon; Schneider, Dominik; Schumacher, Axel; Ortmann, Christopher (2019): Integration of Flange Connections in the Graph and Heuristic Based Topology Optimization of Crashworthiness Structures. In: Hélder C. Rodrigues, José Herskovits, Cristóvão M. Mota Soares, Aurélio L. Araújo, José Miranda Guedes, João O. Folgado et al. (Hg.): EngOpt 2018 proceedings of the 6th International Conference on Engineering Optimization. Cham: Springer.
- Liu, Zhao; Lu, Jiahai; Zhu, Ping (2016): Lightweight design of automotive composite bumper system using modified particle swarm optimizer. In: *Composite Structures* 140, S. 630–643. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.12.031.
- LST (2020a): LS-DYNA®Keyword User's Manual Volume I. Hg. v. Livermore Software Technology, an ANSYS company. Online verfügbar unter https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna_manual_volume_i_r12.pdf, zuletzt geprüft am 17.03.2022.
- LST (2020b): LS-DYNA®Keyword User's Manual Volume II Material Models. Hg. v. Livermore Software Technology, an ANSYS company. Online verfügbar unter https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna_manual_volume_ii_r12.pdf, zuletzt geprüft am 17.03.2022.
- Lukaszewicz, Dirk H.-J.A. (2014): Automotive Composite Structures for Crashworthiness. In: Ahmed Elmarakbi (Hg.): Advanced composite materials for automotive applications. Structural integrity and crashworthiness. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons (Automotive series), S. 99–127.
- Marzbanrad, Javad; Alijanpour, Masoud; Kiasat, Mahdi Saeid (2009): Design and analysis of an automotive bumper beam in low-speed frontal crashes. In: *Thin-Walled Structures* 47 (8-9), S. 902–911. DOI: 10.1016/j.tws.2009.02.007.
- Olschinka, Christian; Schumacher, Axel (2008): Graph Based Topology Optimization of Crashworthiness Structures. In: *PAMM* 8 (1), S. 10029–10032. DOI: 10.1002/pamm.200810029.
- Ortmann, Christopher (2015): Entwicklung eines graphen- und heuristikbasierten Verfahrens zur Topologieoptimierung von Profilquerschnitten für Crashlastfälle. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal.
- Ortmann, Christopher; Schumacher, Axel (2013): Graph and heuristic based topology optimization of crash loaded structures. In: *Struct Multidisc Optim* 47 (6), S. 839–854. DOI: 10.1007/s00158-012-0872-7.
- Ortmann, Christopher; Sperber, Johannes; Schneider, Dominik; Link, Simon; Schumacher, Axel (2021): Crashworthiness design of cross-sections with the Graph and Heuristic based Topology Optimization incorporating competing designs. In: *Struct Multidisc Optim*, S. 1–15. DOI: 10.1007/s00158-021-02927-x.

- Park, Chung Hae; Lee, Woo Il; Han, Woo Suck; Vautrin, Alain (2008): Improved genetic algorithm for multidisciplinary optimization of composite laminates. In: *Computers & Structures* 86 (19-20), S. 1894–1903. DOI: 10.1016/j.compstruc.2008.03.001.
- Park, Gyung-Jin (2010): Equivalent Static Loads Method for Non Linear Static Response Structural Optimization. 9. LS-DYNA Forum, Bamberg.
- Patel, Neal M.; Kang, Byung-Soo; Renaud, John E.; Tovar, Andrés (2009): Crashworthiness Design Using Topology Optimization. In: *J. Mech. Des.* 131 (6), S. 61013. DOI: 10.1115/1.3116256.
- Pedersen, Claus B.W. (2003): Topology optimization design of crushed 2D-frames for desired energy absorption history. In: *Struct Multidisc Optim* 25 (5-6), S. 368–382. DOI: 10.1007/s00158-003-0282-y.
- Pedersen, Claus B.W. (2004): Crashworthiness design of transient frame structures using topology optimization. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 193 (6-8), S. 653–678. DOI: 10.1016/j.cma.2003.11.001.
- Peeters, Daniël M.J.; Hesse, Simon; Abdalla, Mostafa M. (2015): Stacking sequence optimisation of variable stiffness laminates with manufacturing constraints. In: *Composite Structures* 125, S. 596–604. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.02.044.
- Peters, S. T. (1998): Handbook of composites. 2. ed. London: Chapman & Hall.
- Petrovic, Mario; Nomura, Tsuyoshi; Yamada, Takayuki; Izui, Kazuhiro; Nishiwaki, Shinji (2018): Orthotropic material orientation optimization method in composite laminates. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 57 (2), S. 815–828. DOI: 10.1007/s00158-017-1777-2.
- Reynolds, Neil; Balan Ramamohan, Arun (2014): High-Volume Thermoplastic Composite Technology for Automotive Structures. In: Ahmed Elmarakbi (Hg.): *Advanced composite materials for automotive applications. Structural integrity and crashworthiness*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons (Automotive series), S. 29–50.
- Schneider, Dominik; Link, Simon; Schumacher, Axel; Ortmann, Christopher (2018): Graph and heuristic based topology optimization of crashworthiness composite profile structures manufactured by vacuum infusion and gluing. In: *Proceedings of the 13th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XIII)*. New York City, USA, 22-27.07.18.
- Schneider, Dominik; Schumacher, Axel (2018): Finding Optimized Layouts for Ribs on Surfaces Using the Graph and Heuristic Based Topology Optimization. In: Axel Schumacher, Thomas Vietor, Sierk Fiebig, Kai-Uwe Bletzinger und Kurt Maute (Hg.): *Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization. Proceedings of the 12th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO12)*. Cham: Springer International Publishing, S. 1615–1628.

- Schneider, Dominik; Schumacher, Axel; Donhauser, Tobias; Huf, Alexander; Schmeer, Sebastian (2019): Flexible Graph Syntax for the Topology Optimization of Crashworthiness Profile Structures Made from Thermoplastic Composites. In: *KEM* 809, S. 493–499. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.809.493.
- Schneider, Dominik; Schumacher, Axel; Huf, Alexander; Schmeer, Sebastian (2021): Results of the graph and heuristic based topology optimization for crashworthiness profiles made of fiber reinforced thermoplastics. <https://doi.org/10.7910/DVN/C4YDIF>, Harvard Dataverse, V1.
- Schumacher, Axel (2013): Optimierung mechanischer Strukturen. Grundlagen und industrielle Anwendungen. 2., aktual. u. erg. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Seangatith, Sittichai (2008): Study on impact responses of pultruded GFRP, steel and aluminum beams by using drop-weight impact test. In: *Suranaree Journal of Science and Technology* (15.3), S. 191–199. Online verfügbar unter <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.486.9950&rep=rep1&type=pdf>.
- Sperber, Johannes; Ortmann, Christopher; Schumacher, Axel (2019): Optimal application of triggers for the deformation of crash structures under axial compression with consideration of geometrical imperfections. In: Xu Guo and Hai Huang (Hg.): *Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization. Proc 13th World Congr Struct Multidisc Optim (WCSMO13)*. Beijing, 20-24.05.2019, S. 169–175. Online verfügbar unter <http://www.issmo.net/wp-content/uploads/WCSMO13-Proceeding.pdf>, zuletzt geprüft am 28.10.2021.
- Stander, Nielen; Basudhar, Anirban; Roux, Willem; Witowski, Katharina; Eggleston, Trent; Goel, Tushar; Craig, Ken (2019): LS-OPT User's manual. Hg. v. Livermore Software Technology Corporation. Online verfügbar unter https://www.lsoptsupport.com/documents/manuals/ls-opt/lsopt_60_manual.pdf, zuletzt aktualisiert am 17.03.2022.
- Stegmann, J.; Lund, E. (2005): Discrete material optimization of general composite shell structures. In: *Int J Numer Methods Eng* 62 (14), S. 2009–2027. DOI: 10.1002/nme.1259.
- Svanberg, Krister (1987): The method of moving asymptotes—a new method for structural optimization. In: *Int J Numer Methods Eng* 24 (2), S. 359–373. DOI: 10.1002/nme.1620240207.
- Triller, J.; Immel, R.; Timmer, A.; Harzheim, L. (2021): The difference-based equivalent static load method: an improvement of the ESL method's nonlinear approximation quality. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 63 (6), S. 2705–2720. DOI: 10.1007/s00158-020-02830-x.
- Volz, Karlheinz Holger (2011): Physikalisch begründete Ersatzmodelle für die Crashtoptimierung von Karosseriestrukturen in frühen Projektphasen. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2011. Aachen: Shaker (Schriftenreihe des Fachgebiets für Computational Mechanics, 1).

- Weider, Katrin (2021): Topologische Ableitung zur Optimierung crashbelasteter Strukturen. Düren: Shaker Verlag GmbH (Berichte aus dem Maschinenbau).
- Weider, Katrin; Schumacher, Axel (2018): A Topology Optimization Scheme for Crash Loaded Structures Using Topological Derivatives. In: Axel Schumacher, Thomas Victor, Sierk Fiebig, Kai-Uwe Bletzinger und Kurt Maute (Hg.): *Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization*. Cham: Springer International Publishing, S. 1601–1614.
- Weider, Katrin; Schumacher, Axel (2019): Adjoint Method for Topological Derivatives for Optimization Tasks with Material and Geometrical Nonlinearities. In: H. C. Rodrigues, J. Herskovits, C. M. Mota Soares, A. L. Araújo, J. M. Guedes, J. O. Folgado et al. (Hg.): *EngOpt 2018 Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Optimization*. Cham: Springer International Publishing, S. 867–878.
- Witowski, Katharina; Erhart, Andrea; Schumacher, Peter; Müllerschön, Heiner (2012): Topology Optimization for Crash. 12th International LS-DYNA Users Conference, Detroit, USA.
- Witten, Elmar (2013): *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites. Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Zarei, Hamidreza; Kröger, Matthias; Albertsen, Henrik (2008): An experimental and numerical crashworthiness investigation of thermoplastic composite crash boxes. In: *Composite Structures* 85 (3), S. 245–257. DOI: 10.1016/j.compstruct.2007.10.028.
- Zeng, Duo; Duddeck, Fabian (2017): Improved hybrid cellular automata for crashworthiness optimization of thin-walled structures. In: *Struct Multidisc Optim* 56 (1), S. 101–115. DOI: 10.1007/s00158-017-1650-3.
- Zhang, Zheyi; Hou, Shujuan; Liu, Qiming; Han, Xu (2018): Winding orientation optimization design of composite tubes based on quasi-static and dynamic experiments. In: *Thin-Walled Structures* 127, S. 425–433. DOI: 10.1016/j.tws.2017.11.052.
- Zhu, Guohua; Wang, Zhen; Cheng, Aiguo; Li, Guangyao (2017): Design optimisation of composite bumper beam with variable cross-sections for automotive vehicle. In: *International Journal of Crashworthiness* 22 (4), S. 365–376. DOI: 10.1080/13588265.2016.1267552.

Lebenslauf

Persönliches

Dominik Schneider
Geburtsort Velbert
Geburtsdatum 03.12.1991

Schulbildung

2002 bis 2011 Städtisches Gymnasium Wülfrath

Studium

10/2011 bis 10/2014 Studium Bachelor of Science Maschinenbau an der Bergischen Universität Wuppertal

10/2014 bis 03/2017 Studium Master of Science Maschinenbau an der Bergischen Universität Wuppertal

Seit 04/2017 Promotionsstudium an der Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik an der Bergischen Universität Wuppertal

Berufstätigkeit

06/2013 bis 10/2014 Studentische Hilfskraft am Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen

03/2014 bis 09/2014 Werkstudent bei TECOSIM Technische Simulation GmbH

11/2014 bis 04/2017 Halbe Stelle als technischer Mitarbeiter am Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen an der Bergischen Universität Wuppertal

Seit 05/2017 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen an der Bergischen Universität Wuppertal, Bearbeitung des DFG-Forschungsvorhabens *Entwicklung eines optimierungsgerechten Werkstoffmodells für die automatisierte Topologie- und Formfindung von Crashstrukturen aus thermoplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden*

**Dissertationen vom Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen,
Fakultät 7, Bergische Universität Wuppertal**

1. Dr.-Ing. Christopher Ortmann (2015): Entwicklung eines graphen- und heuristikbasierten Verfahrens zur Topologieoptimierung von Profilquerschnitten für Crashlastfälle, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-3746-3
2. Dr.-Ing. Robert Dienemann (2018): Entwicklung einer Optimierungsmethodik für die Form- und Topologieoptimierung von tiefziehbaren Blechstrukturen, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-6196-3
3. Dr.-Ing. Constantin Diez (2018): Process for Extraction of Knowledge from Crash Simulations by means of Dimensionality Reduction and Rule Mining [<https://dnb.info/1182555063/34>]
4. Dr.-Ing. Manuel Ramsair (2021): Integration der Topologie- und Formoptimierung in den automatisierten digitalen Entwurf von Fachwerkstrukturen, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-7788-9
5. Dr.-Ing. Niklas Klinke (2021): Strategien zur Optimierung von flexibel gewalzten Bauteilen in Karosseriestrukturen, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-7936-4
6. Dr.-Ing. Saad Eddine Hafsa (2021): Topology optimization method for the adaptation of mechanical structures, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-8306-4
7. Dr.-Ing. Katrin Weider (2021): Topologische Ableitung zur Optimierung crashbelasteter Strukturen, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-8248-7
8. Dr.-Ing. Jana Büttner (2022): Effiziente Lösungsansätze zur Reduktion des numerischen Ressourcenbedarfs für den operativen Einsatz der Multidisziplinären Optimierung von Fahrzeugstrukturen, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-8560-0
9. Dr.-Ing. Johannes Sperber (2022): Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung axial belasteter Crashstrukturen, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-8634-8
10. Dr.-Ing. Stefan Mertler: Comparative Analysis of Crash Simulation Results using Generative Nonlinear Dimensionality Reduction, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-8761-1
11. Dr.-Ing. Sven Wielens: Automatische Erstellung von Submodellen für die Craschoptimierung von Fahrzeugkarosserien, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-8717-8

