



Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung axial belasteter Crashstrukturen

Dissertation
zur Erlangung eines Doktorgrades

in der
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
der
Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von
Johannes Sperber
aus Pforzheim

Wuppertal 2021

Tag der mündlichen Prüfung: 03.03.2022

Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht
notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

Johannes Sperber

Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung axial belasteter Crashstrukturen

Dissertation, Bergische Universität Wuppertal,
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik,
Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen, Oktober 2021

Kurzfassung

Stranggepresste Profilstrukturen finden, unter anderem aufgrund ihrer Energieabsorptionseigenschaften, eine weite Verbreitung als Crashstrukturen im Vorderwagen und Heck von Kraftfahrzeugen. Zur effizienten Auslegung dieser Strukturen hinsichtlich ihres Crashverhaltens können Methoden zur Topologieoptimierung eine Schlüsselrolle spielen. Etablierte Methoden zur Topologieoptimierung sind aufgrund der in der Crashsimulation auftretenden Nichtlinearitäten in der Regel ungeeignet. Aus diesem Grund wurden neue Methoden wie die Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung (GHT) entwickelt. Die GHT nutzt mathematische Graphen für eine vereinfachte Beschreibung der Querschnittsgeometrie und konkurrierende Heuristiken zur Topologiemodifikation. Die aus Expertenwissen abgeleiteten Heuristiken wurden dabei mit dem Fokus auf lateral belastete Crashstrukturen (z.B. Fahrzeugschweller im Seitencrash), welche vorwiegend mittels lateraler Kompression und Biegung deformieren, entwickelt.

Bei axial belasteten Crashstrukturen kann die Crashenergie effizient mittels Faltenbeulen absorbiert werden. Im Gegensatz zu lateral belasteten Crashstrukturen müssen hierbei jedoch andere Anforderungen berücksichtigt werden, um eine hohe Energieabsorption bei gleichzeitiger robuster Initiierung und Aufrechterhaltung des Faltenbeulens zu erreichen. Aus diesem Grund werden in der vorliegenden Arbeit neue Heuristiken für die GHT entwickelt, welche die genannten Anforderungen adressieren. Da die Struktureigenschaften axial belasteter Profile zudem sensitiv hinsichtlich kleiner Konstruktionsunterschiede sein können, wird die automatisierte Generierung von FE-Modellen in der Methode erweitert, um geometrische Details berücksichtigen zu können. Zudem sind Triggermechanismen zur Beeinflussung der Struktureigenschaften etabliert und werden daher ebenfalls integriert.

Die Eignung der Methode zur Topologieoptimierung von axial belasteten Crashstrukturen wird in verschiedenen Anwendungsbeispielen aufgezeigt. Aufgrund der implementierten Überprüfung von Fertigungsrestriktionen, der Berücksichtigung von geometrischen Details in der Modellerzeugung sowie der Effizienz hinsichtlich der benötigten Funktionsaufrufe ist die Methode zur Topologieoptimierung von Crashstrukturen in einem industriellen Entwicklungsumfeld geeignet.

Stichworte: Topologieoptimierung, Crashauslegung, Heuristiken, Expertenwissen, mathematische Graphen, axiale Crashlastfälle

Johannes Sperber

Graph and Heuristic based Topology Optimization of crash structures under axial compression loads

Dissertation, University of Wuppertal
School of Mechanical Engineering and Safety Engineering,
Chair for Optimization of Mechanical Structures, October 2021

Abstract

Due to their superior energy absorption capabilities, extruded profile structures are broadly used as crash structures in the front and rear ends of vehicles. For their efficient crash design, topology optimization methods can play a key role. Due to the occurring nonlinearities in vehicle crash simulations, established topology optimization methods are usually inapplicable. Therefore, new methods such as the Graph and Heuristic based Topology Optimization (GHT) were developed. This method uses mathematical graphs for a simplified description of the profile cross-section. Furthermore, competing heuristics based on expert knowledge are used to modify the topology. These heuristics were developed for the optimization of profile structures exposed to lateral compression and/or bending loads (e.g., vehicle rocker under pole impact).

However, for profile structures under axial compression loads (e.g., crash box in front crash), progressive buckling is usually the desired mode of deformation. Compared to laterally loaded profile structures, different considerations must be made to provide high specific energy absorption capabilities while initiating and maintaining a robust crash behavior. To address these challenges, a new set of heuristics is developed in this work. Since the structural responses of profile structures under axial loads can also be sensitive to small variations in the finite element model, the automated model creation process is enhanced to consider geometrical details. Furthermore, trigger mechanisms are established to control the structural behavior. Hence, the method allows for a parameter-based application of trigger mechanisms.

The effectiveness of the topology optimization method is demonstrated in various application examples. The method proves to be suitable for an industrial development environment due to the implemented manufacturability checks, the consideration of geometrical details as well as its effectiveness regarding the required amount of function calls.

Keywords: Topology optimization, crashworthiness design, heuristics, expert knowledge, mathematical graphs, axial impact

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Notwendigkeit leichter Crashstrukturen	1
1.2 Ausgangssituation und Motivation	2
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise	4
2 Technische Grundlagen und Stand der Forschung	7
2.1 Auslegung von crashbelasteten Fahrzeugstrukturen	7
2.1.1 Anforderungen und ausgewählte Crashlastfälle	10
2.1.2 Auslegungsstrategien für Fahrzeugfrontstrukturen	13
2.1.3 Grundlagen und Besonderheiten der Crashsimulation	15
2.2 Profilstrukturen unter axialer Crashbelastung	22
2.2.1 Grundbegriffe und Definition der Deformationsformen	23
2.2.2 Forschungsarbeiten zu Ein- und Mehrkammer-Profilen	27
2.2.3 Triggermechanismen	31
2.3 Grundlagen der Strukturoptimierung	33
2.3.1 Wesentliche Arten und Begriffe der Strukturoptimierung	34
2.3.2 Mathematische Formulierung eines Optimierungsproblems	37
2.3.3 Klassifizierung von Optimierungsalgorithmen	38
2.3.4 Herausforderungen bei der Optimierung von Crashstrukturen	40
2.4 Forschungsarbeiten zur Topologieoptimierung von Crashstrukturen	41
2.4.1 Ground Structure Approach	41
2.4.2 Equivalent Static Loads Method	42
2.4.3 Hybrid Cellular Automata	44
2.4.4 Evolutionary Level Set Method	46
2.4.5 Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung	47
3 Methode der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung	49
3.1 Graphenbasierte Geometriebeschreibung und FE-Modellerzeugung	49
3.2 Heuristiken zur Optimierung von Crashstrukturen	53
3.2.1 Heuristiken zur Topologieänderung	54
3.2.2 Heuristiken zur Formänderung und Dimensionierung	56
3.3 Optimierungsablauf	57
3.3.1 Äußere Optimierungsschleife	57
3.3.2 Innere Optimierungsschleife	60

3.4	Softwarelösung zur Umsetzung des Optimierungsablaufs	62
4	Automatische FE-Modellerzeugung von Profilstrukturen	65
4.1	Applikation geometrischer Imperfektionen	66
4.1.1	Simulation stochastischer Felder	67
4.1.2	Aufbringen auf FE-Netze von Profilstrukturen	70
4.1.3	Einfluss geometrischer Imperfektionen	71
4.2	Berücksichtigung geometrischer Details	75
4.2.1	Verrundungen an Profilkanten	77
4.2.2	Materialansammlungen an Wandknoten im Profilquerschnitt	80
4.3	Parameterbasierte Modellierung von Triggermechanismen	83
4.3.1	Verprägungen/Sicken	84
4.3.2	Ausschnitte	87
4.3.3	Anfasungen	88
4.3.4	Erweiterung der Graphensyntax	89
5	Heuristiken zur Optimierung axial belasteter Crashstrukturen	91
5.1	Anwendung von Heuristiken für lateral belastete Crashstrukturen	93
5.1.1	Diskussion der Anwendbarkeit	93
5.1.2	Weiterentwicklung der Heuristik Use Deformation Space .	95
5.2	Heuristiken zur Verbesserung der Energieabsorptionseigenschaften	100
5.2.1	Modifikation der Außengeometrie	100
5.2.2	Connect Low Energy Walls	101
5.2.3	Split Long Walls	104
5.2.4	Create Different Wall Lengths	106
5.2.5	Insert Small Chambers	108
5.2.6	Create Bitubular Structures	113
5.2.7	Create Cross Structures	116
5.3	Heuristiken zur Initiierung und Aufrechterhaltung von Faltenbeulen	118
5.3.1	Unterstützen des „natürlichen“ Faltenbeulmusters	119
5.3.2	Enforce Deformation Start Position	120
5.3.3	Counter Global Bending	127
5.4	Integration der neuen Heuristiken in den Optimierungsablauf . . .	145
6	Anwendung der entwickelten Methodik	147
6.1	Anwendungsbeispiel 1: Fallturm-Lastfall	148
6.1.1	Initiale Profilgeometrien (Startentwürfe)	148
6.1.2	FE-Modellbildung und Lastfall	150
6.1.3	Optimierungsaufgabe	151

6.1.4	Diskussion exemplarischer Optimierungsergebnisse	153
6.1.5	Identifikation allgemeiner Zusammenhänge	157
6.1.6	Exemplarische Variation weiterer Modellparameter	165
6.1.7	Diskussion der Ergebnisse	168
6.2	Anwendungsbeispiel 2: Optimierung einer Fahrzeugcrashbox	169
6.2.1	FE-Modellbildung und Lastfall	169
6.2.2	Optimierungsaufgabe	171
6.2.3	Optimierungsergebnisse	173
6.2.4	Diskussion der Ergebnisse	182
7	Zusammenfassung und Ausblick	185
	Literaturverzeichnis	188
	Anhang	
A	Studentische Arbeiten	199
B	Weitere Gleichungen zur Heuristik CGB	200
C	Weitere Ergebnisse zu Kapitel 6	202

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

AP	Analysis Plane (Analyseebene)
A6XXX	Aluminium-Magnesium-Silizium-Legierung
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CFE	Crush Force Efficiency
CMS	Crash-Management-System
COG	Center of Gravity (Schwerpunkt)
EA	Evolutionäre Algorithmen
EA-LSM	Evolutionary Level Set Method
ESLM	Equivalent Static Loads Method
FE	Finite Elemente
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
GA	Genetische Algorithmen
GHT	Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung
GRAMB	Graph based Mechanics Builder
GSA	Ground Structure Approach
HCA	Hybrid Cellular Automata
HCATWS	Hybrid Cellular Automata for Thin-Walled Structures
HIC	Head Injury Criterion
HPC	High Performance Cluster

HSR	Hill-Stören-Rice
ID	Identifikationsnummer
KBE	Knowledge Based Engineering
LP	Lotfußpunkt
LSM	Level Set Method
MA	Material Accumulations (Materialansammlungen)
MPDB	Mobile Progressive Deformable Barrier
NCAP	New Car Assessment Programme
OLC	Occupant Load Criterion
PKW	Personenkraftwagen
RC	Rounded Corners (Verrundungen)
RCAR	Research Council for Automobile Repairs
SD	Standard Deviation (Standardabweichung)
SEA	Spezifische Energieabsorption
SF	Skalierungsfaktor
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
SpEx	Spline Extrusion
SRSM	Sequential Response Surface Model
TOC	Topology Optimizer for Crashworthiness structures
WHO	World Health Organisation (Weltgesundheitsorganisation)

Abkürzungen für Heuristiken

BED	Balance Energy Density
CBS	Create Bitubular Structures
CCS	Create Cross Structures
CDWL	Create Different Wall Lengths
CGB	Counter Global Bending
CLEW	Connect Low Energy Walls
CLS	Create Lattice Structures
DNW	Delete Needless Walls
EDSP	Enforce Deformation Start Position
ISC	Insert Small Chambers
RSC	Remove Small Chambers
SBW	Support Buckling Walls
SCW	Support Collapsing Walls
SLW	Split Long Walls
UCG	Use Center of Gravity
UDS	Use Deformation Space
UDSC	Use Deformation Space Compression
UDST	Use Deformation Space Tension

Operatoren

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

Lateinische Zeichen

Symbol	Bedeutung
\mathbf{a}	Beschleunigungsvektor
A	Querschnittsfläche
b_{ext}	Parameter des stochastischen Felds (proportional zur Korrelationslänge in Extrusionsrichtung)
b_{pro}	Parameter des stochastischen Felds (proportional zur Korrelationslänge im Profilquerschnitt)
c	Schallgeschwindigkeit
c_p	Kontaktsteifigkeit
d	Intrusion
d_{max}	maximale Intrusion
$\Delta d_{rel,n,m,t}$	normierte Relativverschiebung
\mathbf{D}	Dämpfungsmatrix
e	Element
E	Elastizitätsmodul
f	Zielfunktion
f^*	Minimum der Zielfunktion
$f^{(i)}$	Funktion eines spezifischen stochastischen Feldes i
F	Kraft
F_{avg}	mittlere Kraft
F_{kr}	kritische Kraft
F_{max}	maximale Kraft
F_p	Penaltykraft
\mathbf{f}	Kraftvektor
g_j	Ungleichheitsrestriktion
g_n	Eindringtiefe
$g_{\{x,y\}}$	Achsen des Graphenkoordinatensystems
h	Verprägungstiefe
h_{cor}	Funktion zur Beschreibung der Eckbereiche von Wandverprägungen

Symbol	Bedeutung
h_{mid}	Funktion zur Beschreibung des Bodens von Wandverprägungen
h_{trans}	Funktion zur Beschreibung der Randbereiche von Wandverprägungen
h_k	Gleichheitsrestriktion
h_{rel}	relative Anfasungstiefe
i	Laufindex
K	Steifigkeitsmatrix
l	Länge
l_{FE}	charakteristische Kantenlänge eines Finiten Elements
l_{ext}	Triggerdimensionen in Extrusionsrichtung
l_{pro}	Triggerdimensionen in Profilquerschnittsebene
l_{Profil}	Profillänge
l_{trans}	Dimension der Eckbereiche einer Verprägung
$l_{\{x,y,z\}}$	Achsen eines lokalen Koordinatensystems
m	Masse
m_{Imp}	Impaktormasse
M	Massenmatrix
n	Laufindex
n_{cd}	Index des aktuellen konkurrierenden Entwurfs der vorangegangenen Iteration
n_i	Index der aktuellen Iteration
n_h	Index der aktuellen Heuristik
n_w	Index der aktuellen Wand
n	Normalenvektor
N_{cd}	Anzahl der konkurrierenden Heuristiken
N_h	Anzahl der Heuristiken zur Topologiemodifikation
N_l	Anzahl der Lastfälle
N_{sp}	Anzahl der Splinepunkte
N_t	Anzahl der Zeitschritte

Symbol	Bedeutung
N_w	Anzahl der Wände des Entwurfs
p	normierte Position
r	Radius
s	Weg
S_{ff}	Funktion der spektralen Leistungsdichte
t	Zeit, Wanddicke (je nach Kontext)
t_0	Startzeit
t_{cham}	Wanddicke nach Anfasung
t_{end}	Endzeit
t_{init}	initiale Wanddicke
t_n	aktueller Zeitpunkt
Δt_{krit}	kritischer Zeitschritt
u	normierte Laufvariable in Extrusionsrichtung
\mathbf{u}	Verschiebungsvektor
\bar{u}_{max}	maximale mittlere innere Energiedichte aller Wände in allen Lastfällen
\tilde{u}_{max,n_w,n_l}	maximale normierte und gewichtete innere Energiedichte
U_{abs}	absorbierte Energie
U_i	innere Energie
U_{kin}	kinetische Energie
v	Geschwindigkeit
\mathbf{v}	Geschwindigkeitsvektor
v_0	initiale Geschwindigkeit
$v_{Imp,0}$	initiale Impaktorgeschwindigkeit
V_{n_w}	Volumen einer Wand n_w
\mathbf{x}	Vektor der Entwurfsvariablen
\mathbf{x}^*	optimaler Satz des Vektors der Entwurfsvariablen
$x_{\{ext,pro,n\}}$	Achsen des Triggerkoordinatensystems

Griechische Zeichen

Symbol	Bedeutung
ϵ	Dehnung
$\dot{\epsilon}$	Dehnrate
ϵ_b	Bruchdehnung
ϵ_{pl}	plastische Dehnung
$\epsilon_{pl,sum}$	Summe der plastischen Dehnungen
μ	Reibwert
ν	Querkontraktionszahl
ρ	Dichte
σ	Spannung
σ_0	energieäquivalente Fließspannung
σ_f	Fließspannung
σ_{ff}	Standardabweichung des stochastischen Feldes
φ	Winkel
φ_{init}	initialer Verdrehwinkel
φ_{Imp}	Impaktorneigungswinkel
φ_{rel}	relativer Verdrehwinkel
$\Phi_{n_1 n_2 n_3}^{(j)(i)}$	Satz an unabhängigen und zufälligen Phasenverschiebungen

1 Einleitung

1.1 Notwendigkeit leichter Crashstrukturen

Nach Angaben der *Weltgesundheitsorganisation* (WHO) wurden im Jahr 2016 1.35 Millionen Menschen weltweit durch Verkehrsunfälle getötet. Diese sind damit die achthäufigste Todesursache in allen Altersgruppen und zählen bei den 5- bis 29-Jährigen als häufigste Todesursache überhaupt (WHO 2018). Die Verbesserung der Verkehrssicherheit ist Ziel zahlreicher nationaler und internationaler Bestrebungen. Beispiele hierfür sind die *Sustainable Development Goals* der Vereinten Nationen (WHO 2018) oder das *Vision Zero* Konzept, welches das langfristige strategische Ziel der Reduzierung der Getöteten und Schwerverletzten im Straßenverkehr auf null hat. Es wird beispielsweise von der Europäischen Kommission (European Commission 2019) oder dem Deutschen Verkehrssicherheitsrat (Deutscher Verkehrssicherheitsrat 2012) angestrebt. Diese Anstrengungen spiegeln sich zudem in aktuellen und zukünftigen gesetzlichen Sicherheitsanforderungen wider (vgl. z.B. (Rat der Europäischen Union 29.03.2019)).

Bei ausschließlicher Betrachtung von Personenkraftwagen (PKW) zeigen verschiedene Studien, dass ein Großteil der tödlichen Unfälle und der Unfallfolgekosten auf Unfälle zurückzuführen ist, welche als Frontalunfälle klassifiziert werden können (vgl. Abbildung 1–1). In Bezug auf die Verbesserung der Fahrzeugsicherheit nimmt die energieabsorbierende Vorderwagenstruktur folglich eine herausragende Rolle ein.

Zudem steigt das Bewusstsein der Bevölkerung für den menschengemachten Klimawandel und dessen Folgen global. Dies hat Auswirkungen auf die gesamte Automobilindustrie. Nicht erst seit dem Pariser Klimaabkommen führen gesetzliche Vorgaben dazu, dass die CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen im Flottendurchschnitt der Automobilhersteller gesenkt werden müssen (vgl. z.B. (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 17.04.2019)). Neben der Verbesserung bestehender und der Entwicklung neuer Fahrzeug- und Antriebskonzepte, beispielsweise batterieelektrischer Fahrzeuge, ist die Reduzierung der Fahrzeugmasse

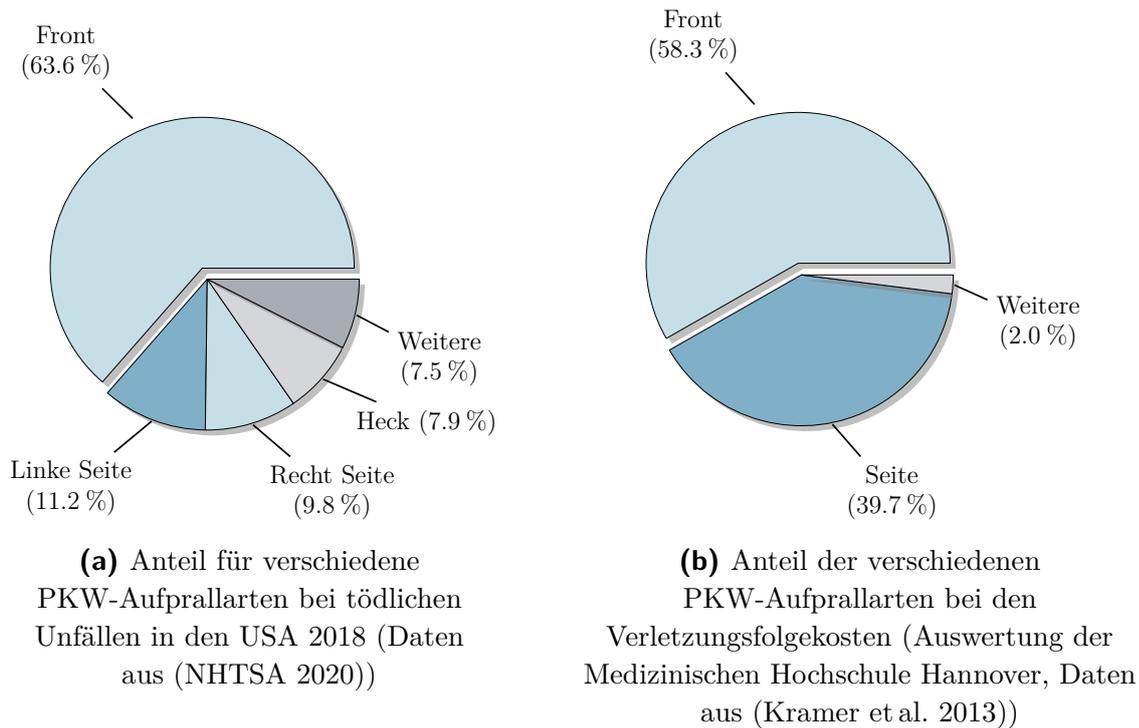


Abbildung 1–1: Ausgewählte Studien zur Bedeutung von Frontalunfällen für die Fahrzeugsicherheit

eine Möglichkeit dieser Herausforderung zu begegnen. Da die Karosserie einen bedeutenden Anteil an der Gesamtmasse ausmacht (ca. 40%, vgl. (Friedrich 2017)), stellt die Anwendung von Leichtbauansätzen hierbei eine bedeutende Stellschraube dar.

Strenge Sicherheitsanforderungen bei gleichzeitiger Notwendigkeit zum Leichtbau sowie die Entwicklung neuer Fahrzeugkonzepte führen zu steigenden Anforderungen an die Karosserie. Zusammen mit sich immer weiter verkürzenden Produktentwicklungszyklen sowie dem Zwang zur Kostenreduzierung führt das zu einem Bedarf an effizienten Auslegungsmethoden in der Fahrzeugentwicklung.

1.2 Ausgangssituation und Motivation

Aufgrund der etablierten, virtuellen Entwicklungsprozesse können Optimierungsmethoden einen entscheidenden Beitrag leisten, um den zuvor genannten Herausforderungen zu begegnen. Methoden zur Topologieoptimierung, welche eine optimale Lage und Anordnung von Strukturelementen im Entwurfsraum anstreben (Schumacher 2020), kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Sie können die

Geometrie der Struktur am grundlegendsten verändern und damit große Verbesserungspotenziale ermöglichen.

Zur Topologieoptimierung von linear-statisch belasteten Strukturen existieren etablierte Methoden (vgl. (Bendsøe und Sigmund 2004)). Diese arbeiten in der Regel mit gradienten- bzw. sensitivitätsbasierten Ansätzen, um eine optimale Verteilung von Material in einem vorgegebenen Entwurfsraum zu finden. Ziel ist dabei häufig ein steifigkeitsoptimiertes Bauteil. Für die Topologieoptimierung von Crashstrukturen können diese Methoden jedoch nicht eingesetzt werden, da die in der Crashsimulation auftretenden Nichtlinearitäten (z.B. nichtlineares Materialverhalten, Kontaktphänomene, geometrische Nichtlinearitäten) oft zu komplexen und verrauschten Strukturantworten sowie Zielfunktionen mit vielen lokalen Minima führen. Zudem erschwert bzw. verhindert die in der Crashsimulation übliche explizite Zeitintegration die Ermittlung der notwendigen Sensitivitäten. Weiter werden in der Optimierung von Crashstrukturen Zielfunktionen wie das Energieabsorptionsvermögen durch plastische Deformationen oder beschleunigungsbasierte Insassenkennwerte benötigt. Diese Strukturantworten können nicht mit linear-statischen FE-Simulationen (Finite Elemente) ermittelt werden.

Aus diesem Grund werden spezielle Methoden zur Topologieoptimierung von Crashstrukturen entwickelt. Eine Methode ist die Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung (GHT) (Olschinka und Schumacher 2008; Ortmann und Schumacher 2013; Ortmann 2015; Ortmann et al. 2021). Die GHT zeichnen zwei wesentliche Eigenschaften aus. Zum einen werden die zu optimierenden Profilstrukturen anhand eines mathematischen Graphen beschrieben. Das ermöglicht die vergleichsweise einfache Änderung der Querschnittsgeometrie sowie die automatisierte Überprüfung von Fertigungsrestriktionen im Optimierungsprozess. Zum anderen werden anstelle von Sensitivitätsinformationen Heuristiken für die Modifikation der Topologie eingesetzt. Bei der GHT wird unter dem Begriff der Heuristik algorithmiertes Expertenwissen verstanden. Zur besseren Entwurfsraumabtastung werden in der GHT konkurrierende Heuristiken mit vielfältigen Optimierungszielen verwendet.

Die bisher vorgestellten Heuristiken wurden im Wesentlichen für die Optimierung von lateral belasteten Profilstrukturen, wie sie beispielsweise im Fahrzeugschweller für Seitencrashlastfälle eingesetzt werden, entwickelt. Hierfür wird die Methode bereits erfolgreich, auch im industriellen Umfeld, angewendet. Diese Profilstrukturen absorbieren die kinetische Energie eines Unfalls in der Regel über plastische Deformationen mittels lateraler Kompression und Biegedeformation. Für eine effiziente Energieabsorption eignen sich hierbei besonders gut Lastpfade im Profil-

querschnitt, das Ausnutzen des Deformationsraums sowie das Vermeiden kleiner Kammern im Profilquerschnitt.

Das steht häufig im Gegensatz zu effizienten axial crashbelasteten Profilstrukturen, wie sie etwa im Fahrzeugvorderwagen zur Energieabsorption bei einem Frontalcrash eingesetzt werden. Die angestrebte Deformationsform ist hierbei oftmals das sogenannte Faltenbeulen, also das sukzessive Ausbilden von lokalen plastischen Faltungen der Profilwände entlang der Profillängsachse. Chen et al. (2005) bezeichnen Faltenbeulen als die effektivste, aber gleichzeitig als die am schwersten zu erreichenden Deformationsform bei axial belasteten Crashstrukturen. Das robuste Initiieren und die Aufrechterhaltung von Faltenbeulen ist ein wesentliches Auslegungsziel. Insbesondere bei schräg-axialen Belastungen, wie sie im realen Unfallgeschehen häufig auftreten, neigen Profilstrukturen zu einer Deformation mittels globaler Biegung. Diese reduziert das Energieabsorptionsvermögen signifikant. Bei realen Crashstrukturen ist daher der Einsatz von sogenannten Triggermechanismen Stand der Technik. Diese sind häufig als lokale geometrische Imperfektionen wie Verprägungen oder Ausschnitte ausgeführt.

1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist es, im Rahmen der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung (vgl. Kapitel 3) eine Methodik zur effizienten und automatisierten Optimierung der Struktureigenschaften axial belasteter Crashstrukturen, wie sie beispielsweise für Crashboxen und Längsträger in Kraftfahrzeugen eingesetzt werden, zu entwickeln. Die Methodik soll auf Bauteile angewendet werden, welche über ihre gesamte Länge einen konstanten Profilquerschnitt besitzen und mittels Strangpressen hergestellt werden können. Kern der Optimierungsmethode ist, wie bei der Optimierung lateral belasteter Crashstrukturen mit der GHT, die Reduktion der zu optimierenden Geometrie auf ein zweidimensionales Querschnittsoptimierungsproblem. Dabei wird die Geometrie mittels mathematischer Graphen abstrahiert und die Topologie mittels aus Expertenwissen abgeleiteter Heuristiken modifiziert. Für die Funktionsaufrufe der Optimierungsmethode, welche üblicherweise nichtlineare dynamische FE-Simulationen sind, wird der zweidimensionale Graph in ein dreidimensionales FE-Modell übersetzt, welches im weiteren Prozess mittels expliziter FE-Simulation berechnet wird.

Weiterhin wird die Aufteilung des Optimierungsproblems in eine äußere und eine innere Optimierungsschleife vom Ansatz für lateral crashbelastete Profilstruktu-

ren übernommen. Dabei werden die Heuristiken zur Topologiemodifikation in der äußeren Optimierungsschleife aktiv, während in der inneren Optimierungsschleife mathematische Optimierungsmethoden zur Optimierung von Gestalt und Dimensionierung eingesetzt werden.

Da bei axial belasteten Crashstrukturen geringfügige Strukturänderungen und Modellierungsdetails zu großen Unterschieden in den Strukturantworten führen können (vgl. (Fyllingen et al. 2007)), wird dieser Aspekt zunächst exemplarisch mit Hilfe von stochastischen Imperfektionen, welche fertigungsbedingte Geometrieungenauigkeiten abbilden, untersucht (vgl. Abschnitt 4.1). Weiter werden gestaltungs- und fertigungsbedingte Einflüsse in die Modellierung implementiert, um die Abbildungsgenauigkeit im automatisierten Optimierungsprozess zu verbessern (vgl. Abschnitt 4.2). Dazu zählen die Berücksichtigung von Verrundungen an den Profilkanten sowie Materialanhäufungen an Wandknoten eines Strangpressprofils.

Für die robuste Initiierung und Aufrechterhaltung von Faltenbeulen ist die Verwendung von Triggermechanismen Stand der Technik. Aus diesem Grund ist eine Erweiterung der Graphensyntax sowie die Integration der Trigger in den automatischen Modellbildungs- und Optimierungsprozess der GHT erforderlich (vgl. Abschnitt 4.3). Durch die Integration in die Graphensyntax ist eine Nutzung der Triggermechanismen im Optimierungsprozess möglich. Zum einen können dadurch Heuristiken entwickelt werden, welche Lastfall-spezifisch Triggermechanismen einbringen. Zum anderen können die Triggerparameter in der inneren Optimierungsschleife genutzt werden.

Zur zielgerichteten Topologieoptimierung axial belasteter Crashstrukturen ist die Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen und Deformations- bzw. Energieabsorptionsformen von axial belasteten Crashstrukturen in den Heuristiken notwendig. Häufiges Ziel einer Optimierung ist es, das spezifische Energieabsorptionsvermögen durch Faltenbeulen im Bauteil mittels geeigneter Topologien bzw. Geometrien zu erhöhen und dabei das Faltenbeulen robust zu initiieren und aufrecht zu erhalten. Üblicherweise wird ein konstanter Kraft-Weg-Verlauf angestrebt. Die Deformation mittels globaler Biegung oder in einer Euler-ähnlichen Knickform wird, soweit möglich, durch geeignete Maßnahmen vermieden. Das ist insbesondere unter den vielfältigen Einflüssen und Lastfällen bei der Gesamtfahrzeug-Crashauslegung eine große Herausforderung. Das Expertenwissen für die Entwicklung der entsprechenden Heuristiken wird aus der Literatur, in Expertenrunden und durch eigene Untersuchungen ermittelt. Um dieses Wissen in der Methode nutzen zu können, wird es abstrahiert und entsprechende Algorithmen, welche in der GHT nutzbar sind, abgeleitet (vgl. Kapitel 5).

Um die Effizienz der entwickelten Methode für die Topologieoptimierung axial belasteter Crashstrukturen zu untersuchen, wird diese in Kapitel 6 auf typische Crashstrukturen angewendet. Im ersten Anwendungsbeispiel wird die Topologie von Profilstrukturen mit unterschiedlicher Außengeometrie in einem Fallturmversuch mit variierenden Impaktor-neigungswinkeln untersucht. Das zweite Beispiel stellt eine typische Ingenieursanwendung dar, in der die Topologie einer Crashbox in einem RCAR-Frontcrash-Lastfall optimiert wird.

Abbildung 1–2 zeigt den Aufbau der vorliegenden Dissertation. Um eine Orientierung in der Arbeit zu erleichtern, sind für jedes Kapitel entsprechende Schlüsselbegriffe angegeben.

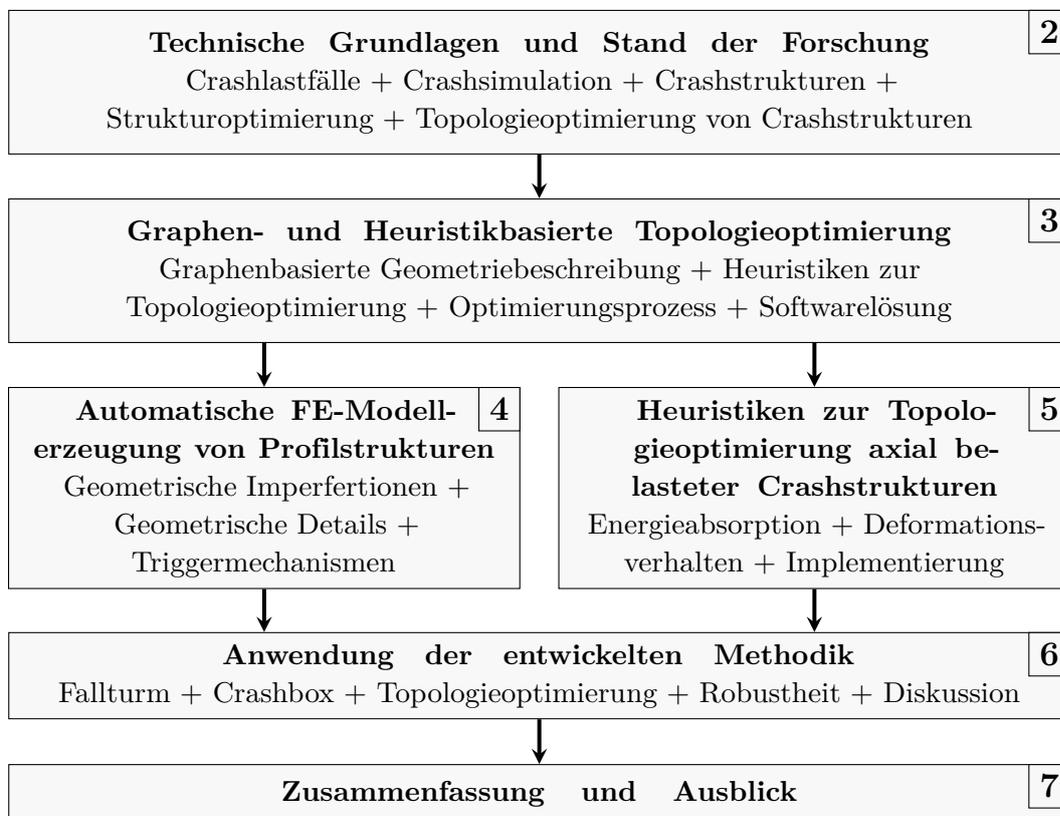


Abbildung 1–2: Aufbau der Dissertation

2 Technische Grundlagen und Stand der Forschung

Dieses Kapitel beschreibt die technischen Grundlagen sowie den Stand der Forschung, auf die diese Arbeit aufbaut. Neben der Automobilindustrie finden effiziente Crashstrukturen auch in anderen Bereichen des Transportsektors Anwendung. Beispiele hierfür sind der Flugzeugbau (Mou et al. 2020), der Bau von Schienenfahrzeugen (Kirkpatrick et al. 2010) oder der Schiffsbau (Paik 2003). Der Automobilbau nimmt hierbei jedoch häufig eine Vorreiterrolle ein, weshalb sich die folgenden Ausführungen darauf beschränken.

Zunächst wird auf die Anforderungen und Vorgehensweisen bei der Auslegung von Fahrzeugstrukturen unter Crashbelastung, insbesondere im Vorderwagen, eingegangen. Zudem werden die Grundlagen und Besonderheiten der Crashsimulation diskutiert. Ein weiterer Schwerpunkt dieses Kapitels sind Profilstrukturen unter axialer Crashbelastung, wobei insbesondere auf Faltenbeulen als Deformationsform sowie auf den Einfluss der Querschnittsgeometrien und Triggermechanismen eingegangen wird. Es folgt eine Einführung in die Grundlagen der Strukturoptimierung und im Speziellen auf die Anforderungen bei der Optimierung crashbelasteter Strukturen. Abschließend wird der Stand der Forschung hinsichtlich der Topologieoptimierung von Strukturen unter Crashbelastung vorgestellt.

2.1 Auslegung von crashbelasteten Fahrzeugstrukturen

Die Anforderungen der Fahrzeugsicherheit sind ein wesentliches Auslegungskriterium bei der Fahrzeugentwicklung. Unter dem Begriff der integralen Sicherheit von Kraftfahrzeugen wird das Zusammenspiel von unfallvermeidenden (aktive Sicherheit) und unfallfolgenmindernden Maßnahmen (passive Sicherheit) zum Erfüllen dieser Anforderungen verstanden (Kramer et al. 2013). Die Maßnahmen

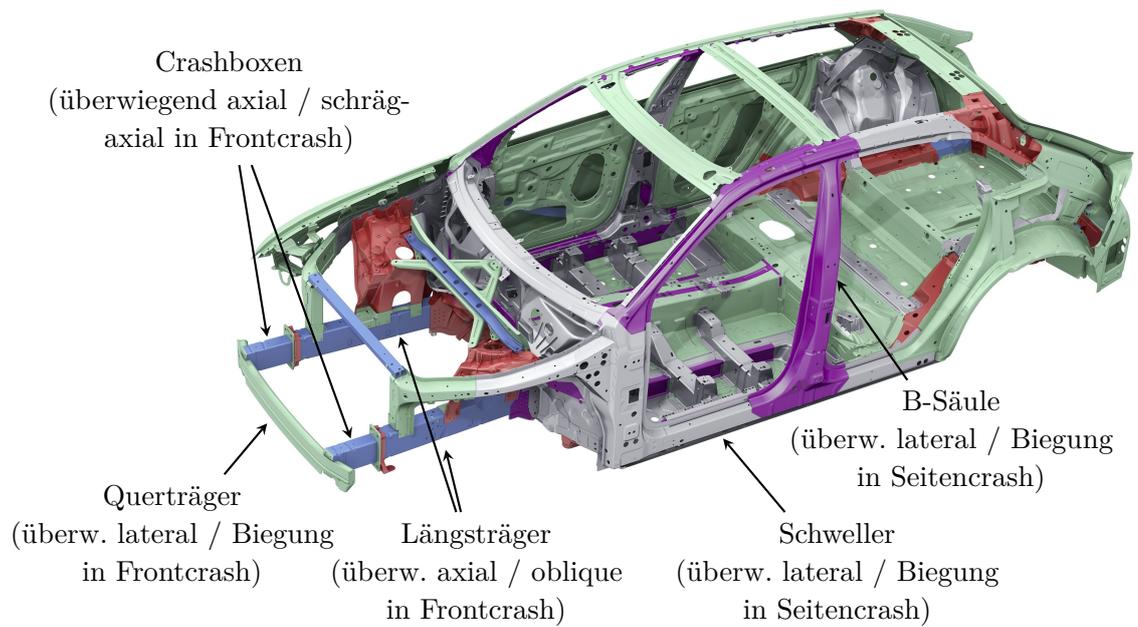
der aktiven Fahrzeugsicherheit haben das Ziel Unfälle zu vermeiden bzw. die Häufigkeit von Unfällen zu reduzieren (Kramer et al. 2013).

Das Ziel der passiven Fahrzeugsicherheit ist es hingegen, für den Fall, dass sich ein Unfall nicht mehr verhindern lässt, die Auswirkungen des Unfalls (z.B. auf die Gesundheit der Insassen) zu begrenzen (Kramer et al. 2013). Hierbei kommt der Fahrzeugkarosserie eine bedeutende Rolle zu:

- Umwandlung der kinetischen Energie des Aufpralls $U_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$ (mit der Fahrzeugmasse m und der Fahrzeuggeschwindigkeit v) durch plastische Deformation in die innere Energie U_i
- Schutz der Insassen durch die Aufrechterhaltung der strukturellen Integrität der Fahrgastzelle und das Einhalten von Belastungsgrenzwerten für die Insassen (z.B. Beschleunigungen)

Die Aufrechterhaltung der strukturellen Integrität sowie das Einhalten von Insassengrenzwerten stehen dabei in einem Zielkonflikt, da steife Strukturen auf der einen Seite zu geringeren Deformationen und folglich zu einer besseren strukturellen Integrität führen können. Auf der anderen Seite resultieren sie jedoch aufgrund des kurzen Deformationswegs in der Regel in hohen Beschleunigungen. Umgekehrt eignen sich weiche Strukturen üblicherweise nicht zum Erhalt der strukturellen Integrität. Zur Lösung dieses Zielkonflikts hat sich bei der Auslegung von Fahrzeugkarosserien daher das Kernprinzip der Aufteilung der Karosserie in einerseits eine vergleichsweise steife und hochfeste Sicherheitsfahrgastzelle sowie andererseits in eine sogenannte Knautschzone, also einen Bereich im Fahrzeug, in dem die kinetische Energie gezielt über einen vorgegebenen Weg mittels plastischer Deformationen in innere Energie umgewandelt werden kann, etabliert. Das Konzept wurde erstmals von Barényi (1952) patentiert.

Strukturen der Fahrzeugkarosserie, zu deren Hauptaufgaben ihr Beitrag zur Erfüllung der Anforderung der passiven Sicherheit gehört, werden in dieser Arbeit (in Anlehnung an (Ortmann 2015)) als Crashstrukturen oder crashbelastete Strukturen bezeichnet. Abbildung 2-1 (a) zeigt eine Karosserie mit typischen Crashstrukturen. Im Falle eines Frontcrashes spielen das Crash-Management-System (CMS, bestehend aus Querträger und Crashboxen) sowie die Längsträger eine bedeutende Rolle bei der Energieabsorption. Im Falle eines Seitencrashes kommt diese Rolle u.a. den Schwellern sowie der B-Säule zu, wobei der zur Verfügung stehende Deformationsraum hierbei bedeutend geringer ist und die Integrität der Fahrgastzelle trotzdem gewahrt werden muss.



(a) Crashstrukturen und ihre typischen Crashbeanspruchungen (Bild: (AUDI AG 2018))

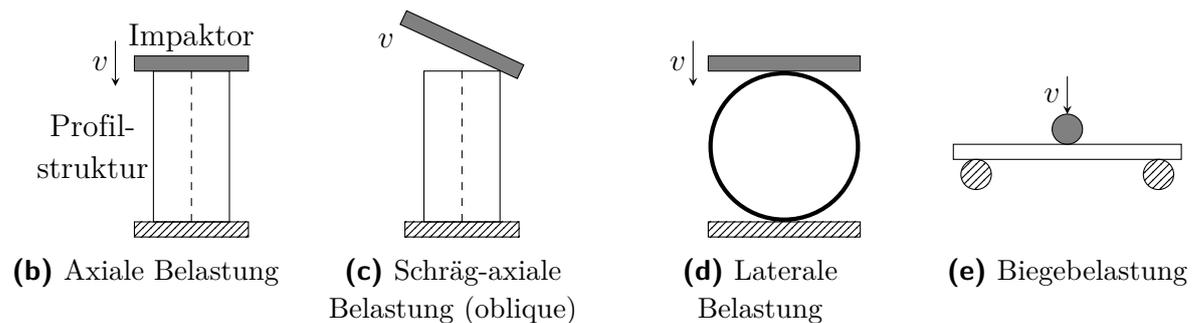


Abbildung 2–1: Crashbelastete Fahrzeugstrukturen und ihre typischen Belastungsformen (modifiziert aus (Baroutaji et al. 2017))

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf crashbelasteten Profilstrukturen, welche Stoßenergie mittels axialer Stauchung bzw. mittels Stauchung unter schräg-axialer Belastung (oblique) absorbieren (vgl. Abbildung 2–1 (b) und (c)). Diese finden insbesondere im Vorderwagen als Crashboxen und Längsträger Anwendung. Ähnliche Strukturen werden ebenfalls im Hinterwagen zur Absorption der kinetischen Energie im Falle eines Heckcrashs eingesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit werden sie als axial belastete Crashstrukturen bezeichnet. Demgegenüber stehen lateral belastete Crashstrukturen, welche die Energie im Falle eines Crashes über laterale Stauchung oder Biegung absorbieren (vgl. Abbildung 2–1 (d) und (e)). Beispiele für vornehmlich lateral belastete Crashstrukturen sind die Schweller und B-Säulen.

Axial belastete Crashstrukturen spielen insbesondere bei der Frontcrashauslegung eine bedeutende Rolle. Daher wird im Folgenden auf die strukturellen Anforderun-

gen von Vorderwagenstrukturen, ausgewählte Crashlastfälle sowie Umsetzungskonzepte und Auslegungsmethoden eingegangen.

2.1.1 Anforderungen und ausgewählte Crashlastfälle

Vorderwagenstrukturen unterliegen einer Vielzahl teilweise konkurrierender Anforderungen. Eine Übersicht ist in Abbildung 2–2 dargestellt. Neben den Anforderungen an die passive Fahrzeugsicherheit werden diese hinsichtlich Betriebsfestigkeit, Steifigkeiten und Leichtbauaspekten ausgelegt. Zudem müssen sie diverse Tragfunktionen erfüllen. Weitere Anforderungen ergeben sich aus dem gewählten Fahrzeug- und Antriebskonzept und beinhalten unter anderem Bauraumrestriktionen (Beeh 2015).

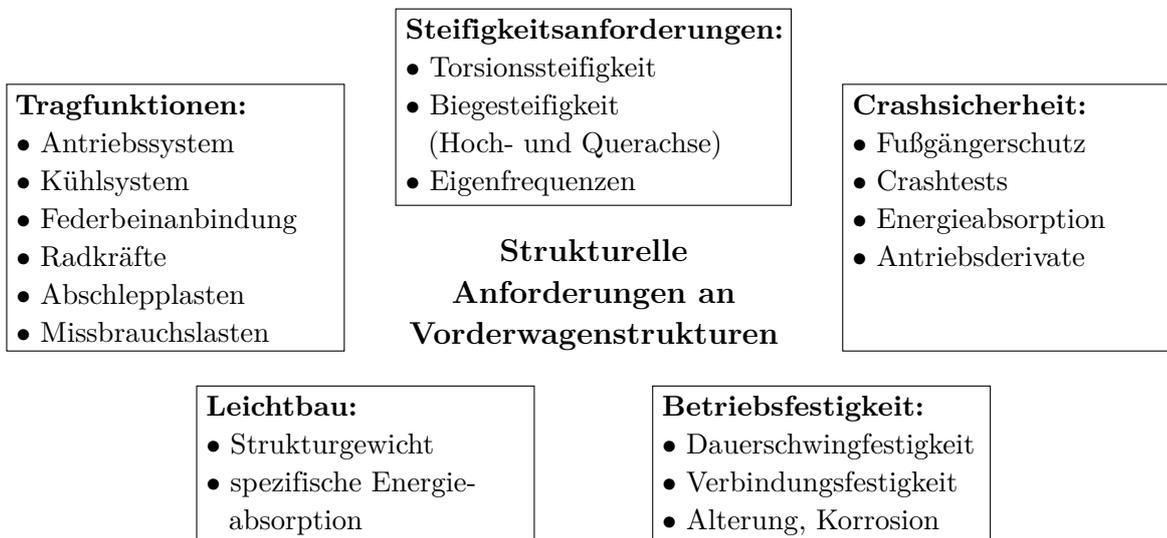


Abbildung 2–2: Strukturelle Anforderungen an Vorderwagenstrukturen (modifiziert aus (Beeh 2015))

Viele der Anforderungen an die passive Fahrzeugsicherheit leiten sich aus gesetzlichen Vorgaben sowie den Prüfprogrammen von Versicherungsgesellschaften und Verbraucherschutzorganisationen ab (Kramer et al. 2013). Je nachdem in welcher Region ein Fahrzeug zugelassen werden soll, können sich die Anforderungen unterscheiden. Darüber hinaus formulieren und untersuchen Fahrzeughersteller häufig zusätzliche Anforderungen und Lastfälle, insbesondere dann, wenn der Hersteller ein sicherheitsbezogenes Markenprofil anstrebt (Kramer et al. 2013).

Stellvertretend für die Vielzahl an unterschiedlichen Crashtests (vgl. (Hoffmann und Reuter 2018) für eine umfangreiche Übersicht) werden an dieser Stelle ein

Frontcrash-Lastfall mit niedriger Geschwindigkeit (Lowspeed) und zwei Hochgeschwindigkeits-Frontcrash-Lastfälle (Highspeed) näher betrachtet. Alle drei Crashlastfälle sind in Abbildung 2–3 dargestellt.

Der *RCAR Front Impact* Crashlastfall (vgl. Abbildung 2–3 (a) und (RCAR 2017)) ist ein Versicherungseinstufungstest, welcher das Ziel hat, die Beschädigungen und die damit verbundenen Reparaturkosten nach einem Unfall mit einer vergleichsweise geringen Geschwindigkeit von 15 km/h (bzw. 16 km/h mit Toleranzen) zu bewerten. In diesem Lastfall wird das Fahrzeug mit der genannten Geschwindigkeit und mit einer Überdeckung von 40 % der Fahrzeugbreite gegen eine starre Barriere gefahren. Die Barriere verfügt über einen Neigungswinkel von 10° und eine abgerundete Kante mit einem Radius von 150 mm.

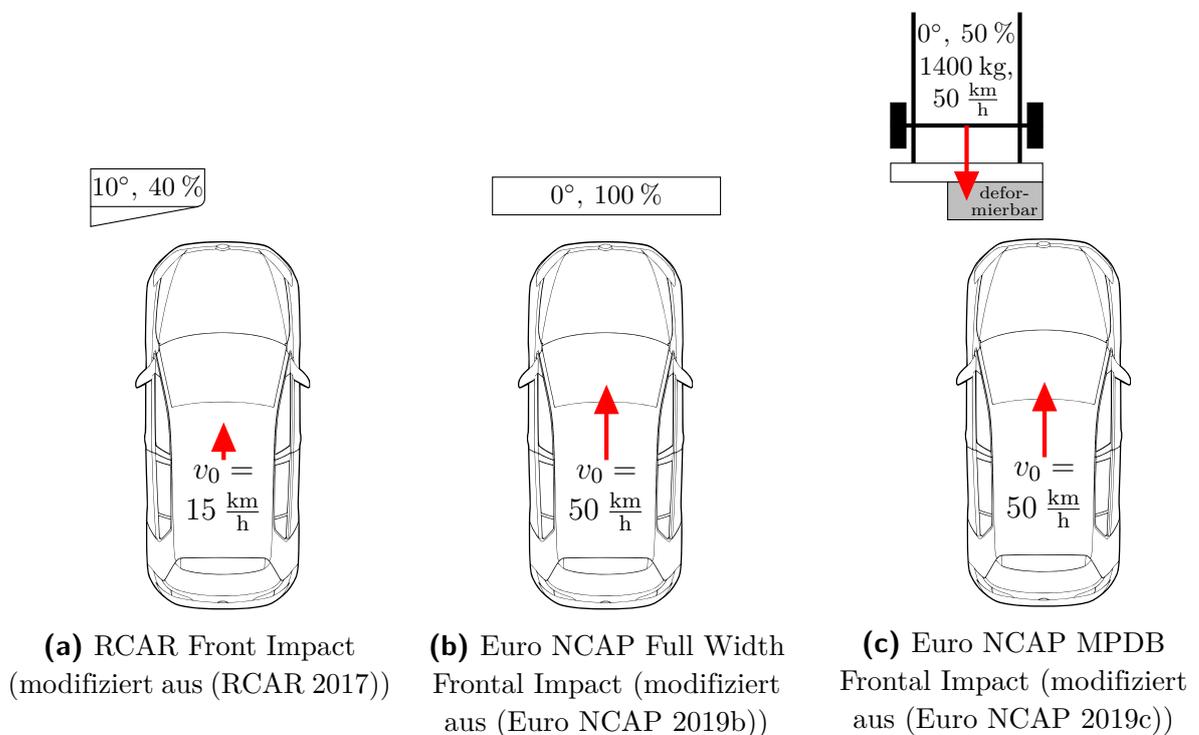


Abbildung 2–3: Exemplarische Lowspeed und Highspeed Front-Crash-Lastfälle

Während es sich beim *RCAR Front Impact* Crashlastfall um einen Lastfall zur Abschätzung von Sachschäden handelt, haben die meisten Hochenergie- bzw. Hochgeschwindigkeits-Lastfälle das Ziel die Schutzwirkung des Fahrzeugs für die Insassen zu bewerten. Diese Lastfälle werden auf Basis von Unfallforschung aus dem realen Unfallgeschehen abgeleitet (Kramer et al. 2013). Abbildung 2–3 (b) und (c) zeigen zwei entsprechende Lastfälle, welche zum Testprogramm der Verbraucherschutzorganisation *Euro NCAP* gehören. Der *Full Width Frontal Impact* (Euro NCAP 2019b) ist ein Aufprall des Fahrzeugs mit 50 km/h und bei

voller Überdeckung auf eine starre Wand. Beim *Mobile Progressive Deformable Barrier (MPDB) Frontal Impact* (Euro NCAP 2019c) stößt das Fahrzeug bei 50 % Überdeckung frontal mit einer ebenfalls fahrenden 1400 kg schweren Barriere zusammen. Barriere und Fahrzeug weisen vor dem Zusammenstoß jeweils eine Geschwindigkeit von 50 km/h auf. Die Barriere ist am Ort des Zusammenstoßes mit einer verformbaren Wabenstruktur ausgestattet, welche die Strukturnachgiebigkeit des Unfallgegners simulieren soll und welche sich bei zunehmender Deformation versteift.

Die Bewertungskriterien für die Insassensicherheit variieren je nach spezifischem Lastfall. Typischerweise werden jedoch Crashtest-Dummy-Messwerte für die Bewertung der Verletzungsschwere herangezogen. Zum Auswerte-Protokoll für die Euro NCAP Crashtests (Euro NCAP 2019a) gehören hierbei unter anderem Kriterien für die beschleunigungsbedingte Kopfbelastung (*Head Injury Criterion - HIC*), sowie Kriterien für Kräfte und Momente, welche am Hals der Insassen angreifen, Kriterien für die Brust eindrückung sowie Kriterien für weitere Körperteile. Aus diesen Insassen-Kriterien lassen sich Strukturanforderungen wie die Integrität der Fahrgastzelle, maximale Intrusionen in die Fahrgastzelle oder die maximale Verzögerungsrate des Fahrzeugs aufgrund der deformierenden Crashstrukturen ableiten.

Im MPDB-Test werden zudem Bewertungskriterien für die Kompatibilität berücksichtigt. Reale Unfälle ereignen sich nur selten zwischen Fahrzeugen der gleichen Masse und unter Laborbedingungen (Kramer et al. 2013). Stattdessen treffen dort Fahrzeuge unterschiedlicher Massen, mit unterschiedlichen Crashkonzepten und unter verschiedensten Randbedingungen aufeinander. Unter dem Begriff der Kompatibilität wird in der Fahrzeugsicherheit daher die *Verträglichkeit bei Unfällen*, also wie die Crashkonzepte unterschiedlicher Fahrzeuge zusammenwirken, verstanden (Kramer et al. 2013). Im MPDB-Lastfall wird daher unter anderem die Verzögerung des Barrieren-Wagens mit dem *Occupant Load Criterion* (OLC, vgl. (Böhme 2020)) sowie das Deformationsbild der Barriere bewertet.

Zum Erreichen der gesetzlich geforderten Grenzwerte oder der vom Hersteller gesetzten Anforderungen an die Fahrzeugsicherheit ist ein komplexes Zusammenspiel aus Deformationsstrukturen in der Karosserie und Rückhaltesystemen (z.B. Airbag, Gurt, Gurtstraffer) unter Berücksichtigung weiterer Aspekte (z.B. Antriebsvariante, Interieur, etc.) notwendig (Kramer et al. 2013). In Bezug auf die Frontcrash-Lastfälle nimmt die energieabsorbierende Karosseriestruktur im Vorderwagen eine maßgebende Rolle ein.

2.1.2 Auslegungsstrategien für Fahrzeugfrontstrukturen

Zur Erfüllung der im vorangegangenen Abschnitt erläuterten Anforderungen weisen moderne Fahrzeugfrontstrukturen üblicherweise mit dem Deformationsweg progressiv ansteigende Kraftabstufungen auf (vgl. Abbildung 2–4). Ziel der einzelnen Stufen ist es jeweils unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen so viel Energie wie möglich zu absorbieren, ohne die daran anschließenden Strukturkomponenten zu beschädigen. Die nachfolgenden Ausführungen orientieren sich an der Einteilung von Schwanitz (2016).

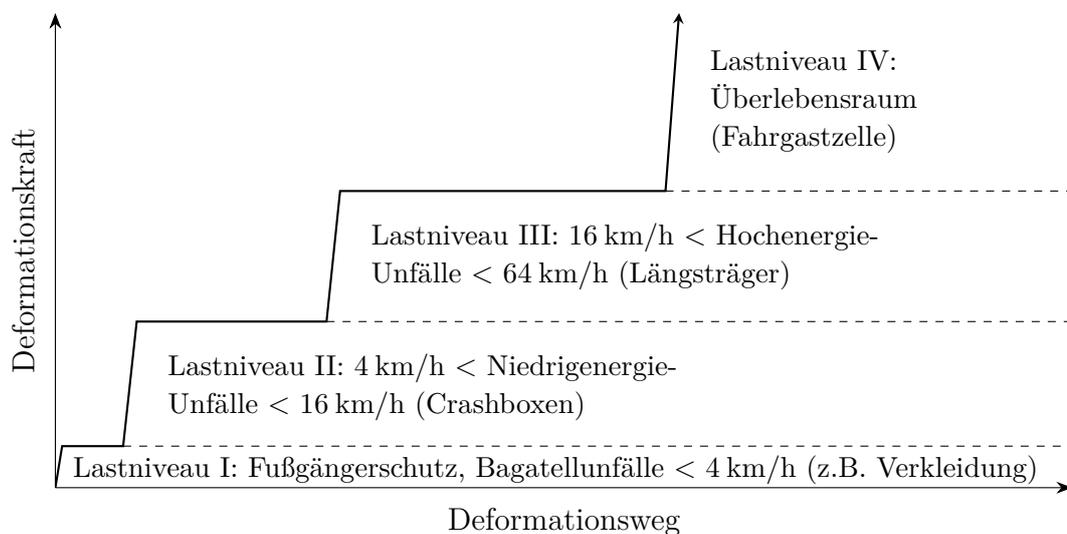


Abbildung 2–4: Exemplarischer Deformationskraftverlauf mit Zuordnung der Lastniveaus (in Anlehnung an (Kröger 2002; Schwanitz 2016))

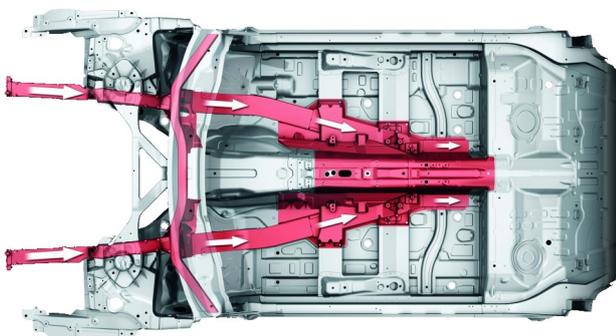
Der erste Bereich (Lastniveau I) dient zum Schutz von ungeschützten Verkehrsteilnehmern wie Fußgängern. Üblicherweise werden Kunststoffe und Schäume in dieser Zone eingesetzt, welche bei Bagatellunfällen mit geringen Geschwindigkeiten (< 4 km/h) zudem häufig reversibel deformieren (Schwanitz 2016).

Daran anschließend folgt das Lastniveau II, welches üblicherweise für Niedrigenergie-Unfälle (vgl. beispielsweise Abbildung 2–3 (a)) mit Geschwindigkeiten bis zu 16 km/h ausgelegt ist. Zur Energieabsorption werden hierbei zumeist irreversibel deformierende Energieabsorber, sogenannte Crashboxen, eingesetzt, welche mit dem Ziel geringer Reparaturkosten austauschbar gestaltet sind (Schwanitz 2016). Bei Crashboxen können verschiedenste Energieabsorptionsmechanismen eingesetzt werden (vgl. (Kröger 2002; Beeh 2015)). Das am meisten verbreitete Deformationsprinzip ist dabei die Energieabsorption durch die plastische Deformation von Profilstrukturen mittels Faltenbeulen. Alternative Deformationsprinzipien

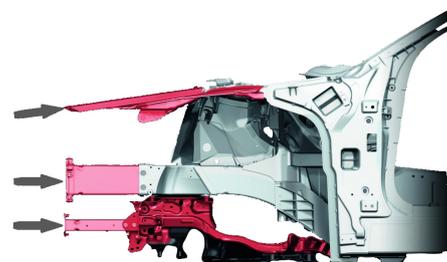
sind beispielsweise das Crushing von Faserverbundstrukturen oder das Aufweiten von Profilstrukturen. Dieses Lastniveau ist zudem bedeutend mit Blick auf die Kompatibilität.

Lastniveau III ist für Hochenergie-Unfälle bis zu einer Geschwindigkeit von ca. 64 km/h ausgelegt (vgl. Abbildung 2–3 (b) und (c)). Das wichtigste Ziel ist hierbei der Selbstschutz durch die gezielte Energieabsorption bei gleichzeitiger Einhaltung der Grenzwerte für die Insassenbelastung (Schwanitz 2016). Dieses Lastniveau kann einen Einfluss auf die Kompatibilität haben. Die Energieabsorption in diesem Lastbereich erfolgt üblicherweise durch die Längsträger. Aufgrund der großen Deformationen müssen bei der Auslegung eine Vielzahl von Komponenten im Vorderwagen mitberücksichtigt werden. Übliche Auslegungskonzepte für die Energieabsorption und das Einhalten der Insassengrenzwerte sind hierbei die Deformation der Längsträger mittels Faltenbeulen oder das sogenannte Längsträgerknicken (vgl. (Böhme 2020)).

Die hochfeste Sicherheitsfahrpassagierzelle bildet Lastniveau IV. Sie soll den Insassen einen Überlebensraum bieten und sich daher im Falle eines Unfalls so wenig wie möglich verformen. In diesem Lastbereich können schwere oder tödliche Verletzungen der Insassen aufgrund starker Verzögerungen und möglicher Intrusionen in die Fahrgastzelle auftreten (Schwanitz 2016). Abbildung 2–5 (a) zeigt eine mögliche Lasteinleitung über die Längsträger in den Mittelunnel. Weitere Lastpfade können unter anderem über den Aggregateblock und, insbesondere bei außermittigen Lastfällen, zudem über die Vorderräder und den Seitenschweller verlaufen (Friedrich 2017). Fahrzeuge können zudem über mehrere Lastebenen zur Aufteilung der Crashlasten verfügen (vgl. Abbildung 2–5 (b)).



(a) Lastpfade im Audi A8-Unterboden
(AUDI AG 2011)



(b) Lastpfade im Audi A8-Vorderwagen (AUDI AG 2011)

Abbildung 2–5: Exemplarische Lastpfade im Fahrzeug

Neben der experimentellen Untersuchung und Absicherung von Fahrzeugen in Crashtests sind Crashsimulationen mit der Finiten Elemente Methode (FEM) essenzielle Bestandteile im Entwicklungsprozess von Fahrzeugen. Zur Auslegung von Crashstrukturen werden dabei reale Lastfälle (vgl. Abschnitt 2.1.1) nachgebildet und die zugehörigen Auswertekriterien herangezogen. Die Crashsimulationen ermöglichen die detaillierte Analyse von komplexen physikalischen Zusammenhängen und die rasche Untersuchung verschiedener Varianten.

2.1.3 Grundlagen und Besonderheiten der Crashsimulation

Der Einsatz von Crashsimulationen in der Fahrzeugentwicklung ermöglicht es trotz steigender (Sicherheits-)Anforderungen die Entwicklungszeiträume zu verkürzen und zudem Kosten, insbesondere durch das Reduzieren der Anzahl kostspieliger realer Prototypen, einzusparen. Dieser Abschnitt gibt eine kurze Einführung in ausgewählte Grundlagen und Besonderheiten der Crashsimulation im Vergleich zu linear-statischen FE-Simulationen. Die folgenden Abschnitte basieren im Wesentlichen auf den Ausführungen von Meywerk (2007), Klein (2015) und Wagner (2019), welche sich zudem als weiterführende Literatur anbieten. Als Crashsimulationen werden in dieser Arbeit nichtlineare dynamische Finite Elemente Analysen (FEA), insbesondere von Fahrzeugstrukturen unter schneller Stoßbelastung, bezeichnet. Neben der transienten Betrachtung des Stoßvorgangs zeichnen diese Simulationen zudem das Vorhandensein verschiedener nichtlinearer Zusammenhänge aus (Meywerk 2007):

- Nichtlineare Geometrie (große Verschiebungen, Rotationen bzw. große Verzerrungen)
- Nichtlineare Randbedingungen (Kontaktphänomene)
- Nichtlineares Materialverhalten (z.B. Plastizität)

Das Gleichungssystem einer linear-statischen FE-Simulation (vgl. Gleichung 2–1), welches beispielsweise für Steifigkeitsanalysen eingesetzt wird, kann implizit über das Invertieren der Steifigkeitsmatrix \mathbf{K} gelöst werden. Über eine Multiplikation der invertierten Steifigkeitsmatrix mit den angreifenden Kräften \mathbf{f} können die Verschiebungen \mathbf{u} berechnet werden.

$$\mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{f} \tag{2–1}$$

Im Gegensatz dazu basieren Crashsimulationen auf der Bewegungsgleichung für dynamische, gedämpfte Systeme (vgl. Gleichung 2–2), welche zusätzlich über die Massenmatrix \mathbf{M} , den Beschleunigungsvektor \mathbf{a} , die Dämpfungsmatrix \mathbf{D} sowie den Geschwindigkeitsvektor \mathbf{v} charakterisiert sind. Dabei handelt es sich um eine gewöhnliche lineare Differentialgleichung 2. Ordnung. Für den Zeitpunkt t lautet sie

$$\mathbf{M} \mathbf{a}(t) + \mathbf{D} \mathbf{v}(t) + \mathbf{K} \mathbf{u}(t) = \mathbf{f} . \quad (2-2)$$

Aufgrund der genannten Nichtlinearitäten der Crashsimulation sind die Systemmatrizen (\mathbf{M} , \mathbf{D} und \mathbf{K}) sowie der Kraftvektor \mathbf{f} in der Regel vom aktuellen verformten Zustand des Systems abhängig (Wagner 2019). Somit liegt eine nichtlineare Differentialgleichung 2. Ordnung vor (vgl. Gleichung 2–3).

$$\mathbf{M}(\mathbf{u}(t)) \mathbf{a}(t) + \mathbf{D}(\mathbf{u}(t)) \mathbf{v}(t) + \mathbf{K}(\mathbf{u}(t)) \mathbf{u}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{u}(t)) \quad (2-3)$$

Aufgrund der Diskretisierung der Struktur in der Finiten Elemente Methode hat sich die Lösung dieser Differentialgleichungen mit Methoden der direkten Zeitintegration bewährt. Das implizite Lösen (z.B. mit dem Newmark-Schema) erfordert ein Invertieren der Systemmatrizen für jeden Zeitschritt, ist jedoch unabhängig von der Zeitschrittweite stabil (Klein 2015). Aufgrund des vergleichsweise hohen Rechenaufwands pro Zeitschritt bei den impliziten Verfahren in Kombination mit der notwendigen Anzahl an Zeitschritten zur Untersuchung des Systemverhaltens in der Crashsimulation (z.B. aufgrund von lokalen Effekten oder Kontaktphänomenen) sind die impliziten Verfahren bei Crashsimulationen für gewöhnlich bedeutend ressourcenintensiver als explizite Verfahren und werden folglich nicht eingesetzt (Klein 2015; Ortmann 2015).

Aus diesem Grund kommen Verfahren der expliziten Zeitintegration zur Anwendung, welche die Zustandsgrößen vom aktuellen Systemzustand t_n (im Folgenden mit n abgekürzt) aus zum Zustand im nächsten Zeitpunkt $t_{n+1} = t_n + \Delta t$ (bzw. $n + 1$) extrapolieren. Der Rechenaufwand pro Zeitschritt ist hierbei gering. In der Crashsimulation wird dabei insbesondere das Verfahren der zentralen Differenzen eingesetzt (Klein 2015). Unter der Annahme, dass die Verschiebungen von einem Zeitpunkt zum nächsten linear verlaufen (Wagner 2019) lässt sich dieser Ansatz

näherungsweise für die Geschwindigkeit im aktuellen Zeitpunkt aus dem Mittelwert von Vorwärts- und Ruckwartsdifferenzenquotient bilden:

$$\mathbf{v}_n = \frac{1}{2}(\mathbf{v}_n^{vorw} + \mathbf{v}_n^{rueckw}) = \frac{\mathbf{u}_{n+1} - \mathbf{u}_{n-1}}{2\Delta t} \quad (2-4)$$

mit

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_n^{vorw} &= \mathbf{v}_{n+0.5} = \frac{\mathbf{u}_{n+1} - \mathbf{u}_n}{\Delta t} \\ \mathbf{v}_n^{rueckw} &= \mathbf{v}_{n-0.5} = \frac{\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_{n-1}}{\Delta t}. \end{aligned}$$

Unter der Annahme eines ebenfalls linearen Geschwindigkeitsverlaufs ergibt sich für die Beschleunigungen näherungsweise

$$\mathbf{a}_n = \frac{\mathbf{v}_n^{vorw} - \mathbf{v}_n^{rueckw}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{v}_{n+0.5} - \mathbf{v}_{n-0.5}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{u}_{n-1} - 2\mathbf{u}_n + \mathbf{u}_{n+1}}{\Delta t^2}. \quad (2-5)$$

Die Terme für die Geschwindigkeit (Gleichung 2-4) und Beschleunigung (Gleichung 2-5) im aktuellen Zeitschritt werden anschließend in die Bewegungsgleichung für den Zeitpunkt n eingesetzt:

$$\mathbf{M}_n \frac{\mathbf{u}_{n-1} - 2\mathbf{u}_n + \mathbf{u}_{n+1}}{\Delta t^2} + \mathbf{D}_n \frac{\mathbf{u}_{n+1} - \mathbf{u}_{n-1}}{2\Delta t} + \mathbf{K}_n \mathbf{u}_n = \mathbf{f}_n. \quad (2-6)$$

Ein Umstellen der Bewegungsgleichung nach den unbekanntem Verschiebungen im nächsten Zeitpunkt \mathbf{u}_{n+1} führt mit der diagonalisierten Massenmatrix \mathbf{M} und der zwangsdiagonalisierten Dämpfungsmatrix \mathbf{D} zur Lösbarkeit der Bewegungsgleichung (Klein 2015):

$$\left(\frac{\mathbf{M}_n}{\Delta t^2} + \frac{\mathbf{D}_n}{2\Delta t}\right)\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{f}_n + \left(\frac{2\mathbf{M}_n}{\Delta t^2} - \mathbf{K}_n\right)\mathbf{u}_n + \left(-\frac{\mathbf{M}_n}{\Delta t^2} + \frac{\mathbf{D}_n}{2\Delta t}\right)\mathbf{u}_{n-1}. \quad (2-7)$$

Die unbekanntem Größen \mathbf{v}_{n+1} und \mathbf{a}_{n+1} zum Zeitpunkt $n + 1$ können anschließend über die Gleichungen 2-4 und 2-5 berechnet werden. In einem iterativen Prozess werden die Zustandsvektoren \mathbf{u} , \mathbf{v} und \mathbf{a} sukzessive für alle Zeitschritte im Untersuchungszeitraum bestimmt.

Ein bedeutender Nachteil der expliziten Zeitintegration ist ihre bedingte Stabilität. Diese führt dazu, dass der Zeitschritt Δt einen kritischen Wert Δt_{krit} nicht unterschreiten darf. Der kritische Zeitschritt für Finite Elemente ist für gewöhnlich die Zeit, die eine Information (z.B. Spannungswelle) braucht, um mit der Schallgeschwindigkeit c ein Element mit der Elementkantenlänge l_{FE} zu durchqueren (vgl. Gleichung 2–8). Weiter gehen die Dichte ρ und der Elastizitätsmodul E in die Berechnung ein. Das kleinste Element in einem Modell bestimmt folglich den Zeitschritt und somit die Rechenzeit. In der praktischen Anwendung der Crashsimulation wird daher meist eine Mindestkantenlänge oder eine Zielkantenlänge definiert. Sind dennoch lokal kleinere Elemente notwendig, werden Maßnahmen wie beispielsweise die Massenskalierung eingesetzt. Neben der charakteristischen Elementkantenlänge können weitere Einflussfaktoren den kritischen Zeitschritt beeinflussen (z.B. Kontaktsteifigkeiten bei Penalty-Kontakten (Wagner 2019)).

$$\Delta t < \Delta t_{krit} = \frac{l_{FE}}{c} = l_{FE} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (2-8)$$

Am Anfang dieses Abschnitts wurde bereits verkürzt auf die Nichtlinearitäten in der Crashsimulation eingegangen. Da diese Eigenschaften für die Topologieoptimierung von Crashstrukturen von großer Bedeutung sind, wird im Folgenden auf ausgewählte nichtlineare Effekte der Crashsimulation detaillierter eingegangen.

Geometrische Nichtlinearitäten

Sind die Deformationen der zu untersuchenden Struktur groß, hängt der Systemzustand von der aktuellen Deformation der Struktur ab (vgl. Gleichung 2–3). Die Vereinfachung der geometrisch linearen Betrachtung, dass der Systemzustand ausschließlich von der Ausgangssituation abhängt, ist folglich nicht mehr zulässig. Abbildung 2–6 zeigt drei bedeutende geometrisch nichtlineare Effekte. Die Frage, welche Deformationen als *groß* gelten, lässt sich nicht allgemein definieren. Für einen Winkel φ wird bei einer linearen Beschreibung $\sin \varphi \approx \varphi$ und $\varphi \ll 1$ angenommen. Theoretisch wird bereits bei solchen kleinen Rotationen ein Fehler gemacht. Folglich stellt sich die Frage, welcher Fehler akzeptiert wird. Üblicherweise in der Crashsimulation auftretende Deformationen (z.B. beim Faltenbeulen von Profilstrukturen) erfordern jedoch eindeutig geometrisch nichtlineare Betrachtungen (Wagner 2019).

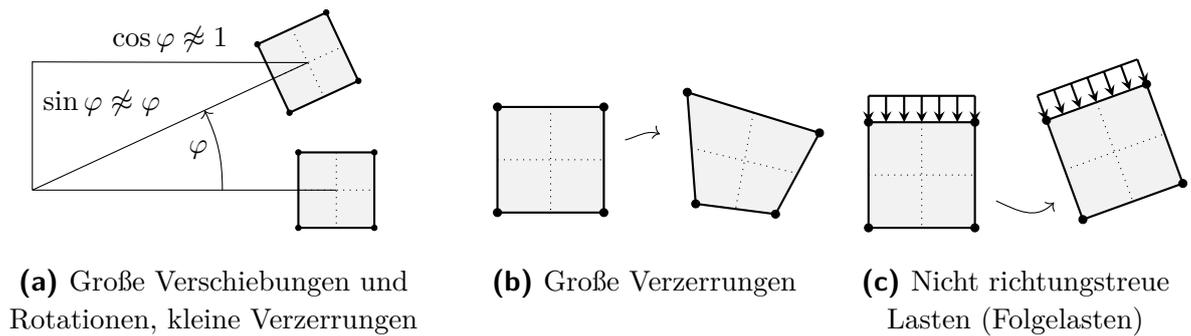


Abbildung 2-6: Unterscheidung geometrisch nichtlinearer Effekte (modifiziert aus (Wagner 2019))

Nichtlineares Materialverhalten

Der Zusammenhang zwischen Verzerrungen und Spannungen wird in der Finiten-Elemente-Methode durch Materialmodelle beschrieben. Neben linear-elastischem Materialverhalten, welches bei Metallen üblicherweise nur für kleine Verzerrungen zutrifft, treten in der Crashsimulation vielfältige Nichtlinearitäten im Materialverhalten auf (Wagner 2019). Abbildung 2-7 zeigt Beispiele für nichtlineares Materialverhalten: irreversible plastische Deformationen, von der Belastungsgeschwindigkeit abhängiges Materialverhalten sowie Materialschädigung und Versagen. Zur Beschreibung dieser Eigenschaften wurden vielfältige Materialmodelle zur phänomenologischen Materialbeschreibung entwickelt, welche üblicherweise jedoch nur ein eingeschränktes Anwendungsspektrum bieten oder auf Vereinfachungen beruhen (Wagner 2019).

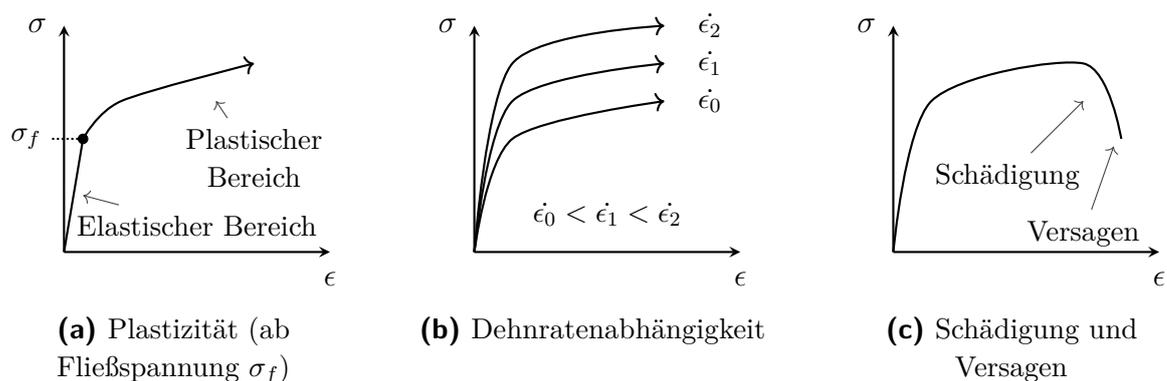


Abbildung 2-7: Beispiele für nichtlineares Materialverhalten (mit Spannungen σ und Dehnungen ϵ)

Kontaktphänomene

Da sich die Feldgrößen aufgrund von Kontaktphänomenen sehr schnell ändern können, kann Kontakt in der Crashsimulation üblicherweise als eine stark nichtlineare Randbedingung angesehen werden (Wagner 2019). Aufgrund großer plastischer Deformationen können Crashstrukturen dabei nicht nur mit anderen Bauteilen, sondern auch mit sich selbst in Kontakt treten (Selbstkontakt). Zur Berücksichtigung von Kontaktphänomenen gibt es eine Vielzahl von Methoden. Bei diskreten Kontaktflächen werden in der Crashsimulation häufig sogenannte Knoten-zu-Segment-Kontakte oder Segment-zu-Segment-Kontakte mit einem Penalty-Verfahren (Bestrafung von Durchdringungen) zur Bestimmung der Kontaktkräfte eingesetzt. In FE-Programmen sind zudem vielfältige weitere Kontaktalgorithmen implementiert.

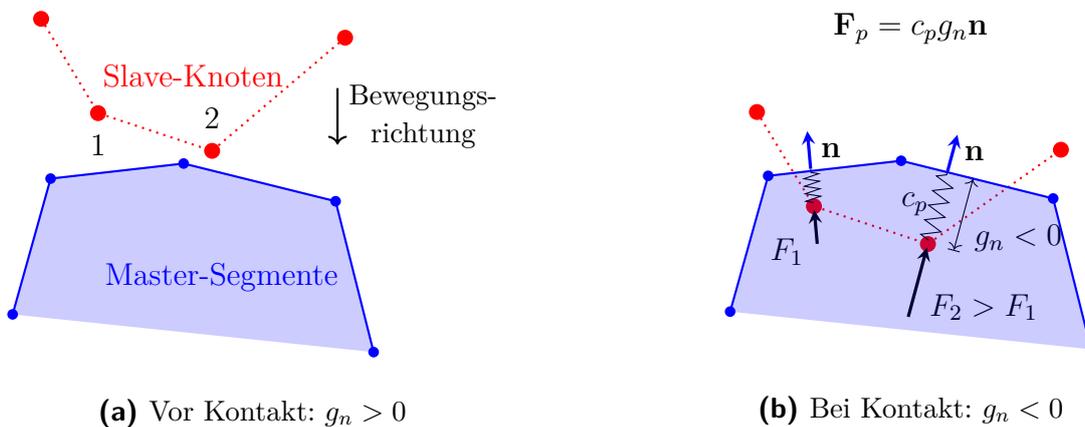


Abbildung 2–8: Penalty-Verfahren für Normalkontakt mit Knoten-zu-Segment-Methode mit Penaltykraft F_p , Kontaktsteifigkeit c_p , Eindringtiefe g_n und Normalenvektor \mathbf{n} (modifiziert aus (Wagner 2019))

Abbildung 2–8 zeigt exemplarisch einen Knoten-zu-Segment-Ansatz mit einer linearen Penalty-Berechnung der Normalkräfte, sobald ein Eindringen der Slave-Knoten in die Master-Segmente detektiert wird. Aufgrund der üblicherweise großen Knoten- und Elementanzahl in der Simulation von Gesamtfahrzeug-Crashmodellen ist die Kontaktsuche sehr rechenintensiv (Wagner 2019). Es werden daher in der Regel Algorithmen eingesetzt, welche die Kontaktbeziehung nur in einer bestimmten Nachbarschaft und zudem nicht in jedem Zeitschritt auswerten (Wagner 2019).

Verzweigungspunkte

Die Existenz von Verzweigungspunkten (Bifurkationen) im Deformationsverhalten bzw. in den Strukturantworten ist ein übliches Phänomen in der Crashsimulation. Verzweigungspunkte können dazu führen, dass vergleichsweise kleine Modellvariationen in einem qualitativ (und quantitativ) anderen Modellverhalten (z.B. Deformationsverhalten) resultieren. In der Simulation können zudem numerische Verzweigungspunkte auftreten. Ortman (2015) führt hier das Beispiel eines perfekten Druckstabs an, für welchen die Richtung des Ausknickens aufgrund der idealen Modellierung in der Simulation zunächst unbekannt ist. Aufgrund von Fertigungs- und Lastimperfektionen ist diese Richtung in der Realität jedoch nicht zufällig, obwohl sie aufgrund fehlender Informationen über die vorhandenen Imperfektionen üblicherweise nicht bestimmt werden kann. Bei der Simulation des idealen Modells führt dieser undefinierte Zustand nach Ortman (2015) dazu, dass unterschiedliche Rundungsoperationen auf unterschiedlichen Computersystemen zu unterschiedlichen Ergebnissen nach einem solchen Verzweigungspunkt führen können.

Alle Struktur- und Lastparameter realer Bauteile und realer (Crash-)Lastfälle weisen Streuungen auf (Schumacher 2020). In der Folge kann es dazu kommen, dass eigentlich gleiche Bauteile in einem eigentlich gleichen Lastfall aufgrund dieser Streuungen physikalische Verzweigungspunkte im Deformationsverhalten aufweisen. Bei dünnwandigen Profilstrukturen unter Crashbelastung kann beispielsweise eine Wand in verschiedene Richtungen ausbeulen, was sich in der Folge auf das gesamte Strukturverhalten auswirken kann (vgl. Abbildung 2–9). Schumacher (2020) empfiehlt daher solche Verzweigungspunkten nach Möglichkeit zu vermeiden (z.B. durch die Vorgabe einer Krümmung für eine Wand mit undefinierter Beulrichtung). Bei der Untersuchung von Profilen unter axialer Crashbelastung können durch Verzweigungspunkte unterschiedliche Deformationsformen initiiert oder die Deformationsform geändert werden (vgl. Abbildung 2–11).

Eine Möglichkeit, um numerische und physikalische Verzweigungspunkte in mechanischen Systemen aufzudecken, sind Robustheitsanalysen. Hierbei werden die Strukturantworten in Abhängigkeit von Streueinflüssen untersucht (Kramer et al. 2013; Andricevic 2016). Für den Begriff der Robustheit von Strukturen existieren verschiedene Definitionen (Beer und Liebscher 2008). In Anlehnung an Schwanitz (2016) wird in dieser Arbeit unter dem Begriff Robustheit das Vermögen einer Struktur verstanden auch bei stochastischen Streuungen der Struktur-, Versuchs- und Materialparameter ein ähnliches Deformationsverhalten aufzuzeigen. Neben statistischen Robustheitsanalysen können beim Aufzeigen von unterschiedlichem

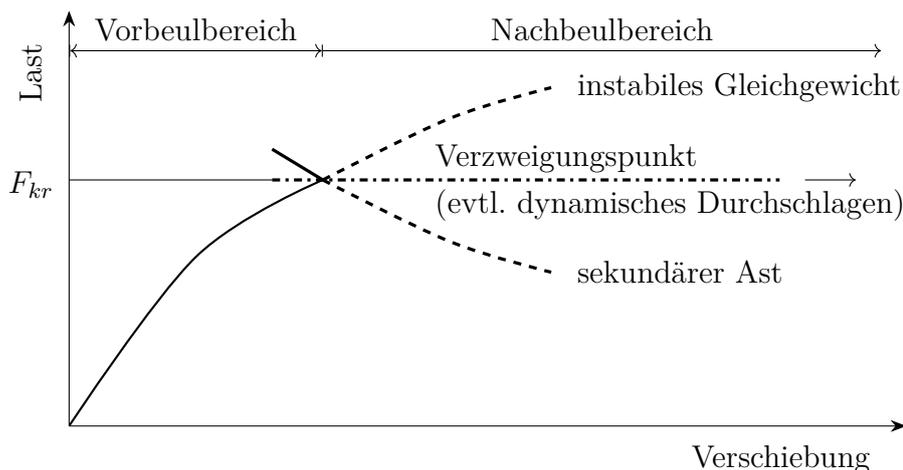


Abbildung 2–9: Last-Verschiebungs-Diagramm eines Verzweigungsproblems (modifiziert aus (Rust 2016))

Strukturverhalten auch Clustering Methoden, also Methoden, welche automatisiert Gruppen von Strukturen mit einem ähnlichen Verhalten finden, eine Rolle spielen (Beer und Liebscher 2008; Diez 2019). Neben der (virtuellen) Robustheitsanalyse von einzelnen Strukturvarianten in der Fahrzeugsicherheit spielt der Begriff zudem eine Rolle in der Optimierung von Crashstrukturen (Ren-Jye Yang et al. 2000; Schwanitz 2016).

2.2 Profilstrukturen unter axialer Crashbelastung

Zur Untersuchung axial belasteter Profilstrukturen werden in der Literatur häufig Komponentenversuche und daraus abgeleitete numerische Simulationen beschrieben. Diese bieten die Möglichkeit der detaillierten Untersuchung von Einflussfaktoren und physikalischen Phänomenen bei gleichzeitiger Effizienz hinsichtlich Kosten und Zeit. Die dabei notwendigen Vereinfachungen im Vergleich zu realen Anwendungsfällen können jedoch zu einer Vernachlässigung wichtiger Abhängigkeiten bei realen Strukturen, wie sie beispielsweise bei komplexen Lastfällen mit einer Vielzahl an umgebende Komponenten üblich sind, führen.

Gängige Komponententests sind quasi-statische Untersuchungen in hydraulischen Pressen und dynamische Untersuchungen mit Pendeltests oder sogenannten Fallturmversuchen. Eine wichtige Charakteristik der dynamischen Untersuchungen ist die zusätzliche Berücksichtigung von Trägheits- und Ausbreitungseffekten (z.B. der Spannungswelle) sowie von Effekten, die aus einem dehnratenabhängigen Materialverhalten folgen.

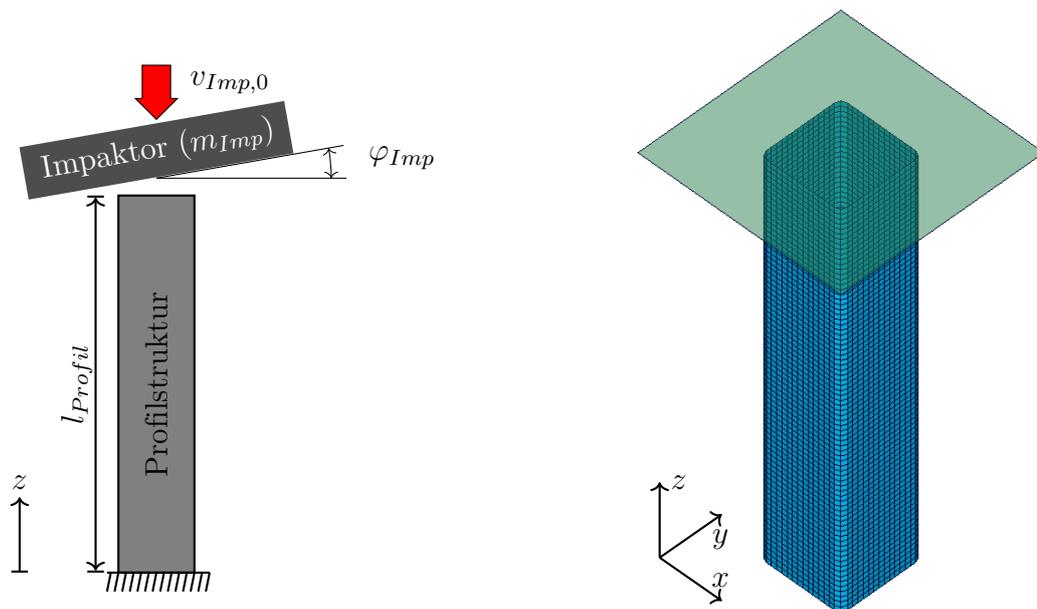


Abbildung 2–10: Schematische Darstellung des Fallturmlastfalls und seine vereinfachte FE-Modellierung

Abbildung 2–10 zeigt eine schematische Darstellung eines Fallturmsversuchs und ein daraus abgeleitetes vereinfachtes FE Modell für die Crashsimulation. Die Profilstruktur ist an einem Ende fest eingespannt und wird von einem als Starrkörper modellierten Impaktor mit der Masse m_{Imp} , der initialen Geschwindigkeit $v_{Imp,0}$ und unter dem Impaktor-neigungswinkel φ_{Imp} belastet. Als Werkstoffe für die Profilstrukturen werden zumeist Aluminiumlegierungen oder Stahl eingesetzt. Diese können in Schalenbauweise und insbesondere bei Aluminiumstrukturen mittels Strangpressen hergestellt werden.

2.2.1 Grundbegriffe und Definition der Deformationsformen

Profilstrukturen unter axialer Druckbelastung können grundsätzlich vielfältige Deformationsformen aufweisen. Andrews et al. (1983) beschreiben für Profilstrukturen mit rundem Querschnitt beispielsweise verschiedene Faltenbeulformen ebenso wie Euler-ähnliche Knickformen, eine simple Kompression der Struktur und verschiedene gemischte Deformationsformen in Abhängigkeit vom Längen-Durchmesser-Verhältnis und Wanddicken-Durchmesser-Verhältnis.

Für die in dieser Arbeit untersuchten dünnwandigen Profilstrukturen unter axialer Crashbelastung werden in Anlehnung an (Han und Park 1999) zwei grundsätzliche

Deformationsformen unterschieden: Faltenbeulen und globale Biegung (Biegekolaps). Beispiele für verschiedene Ausprägungen beider Deformationsformen bei quadratischen Profilstrukturen sind in Abbildung 2–11 dargestellt. Aufgrund der guten Energieabsorptionseigenschaften wird bei der Auslegung von Crashstrukturen in der Regel eine Faltenbeulform angestrebt. Diese kann bei quadratischen Profilstrukturen in Abhängigkeit vom vorliegenden Muster beim Ausbilden der Falten weiter in extensionale, symmetrische und asymmetrische Faltenbeulformen unterteilt werden (Abramowicz und Jones 1984b). Bei der extensionalen Deformationsform können beispielsweise in allen vier Eckbereichen des Profils dieselben Faltungen beobachtet werden, bei welchen beide an die Ecke angrenzende Wände entweder nach innen oder nach außen beulen. Insbesondere bei schräger Belastung bzw. Lasteinleitung in die Profilstruktur können jedoch globale Biegung oder gemischte Deformationsformen auftreten.

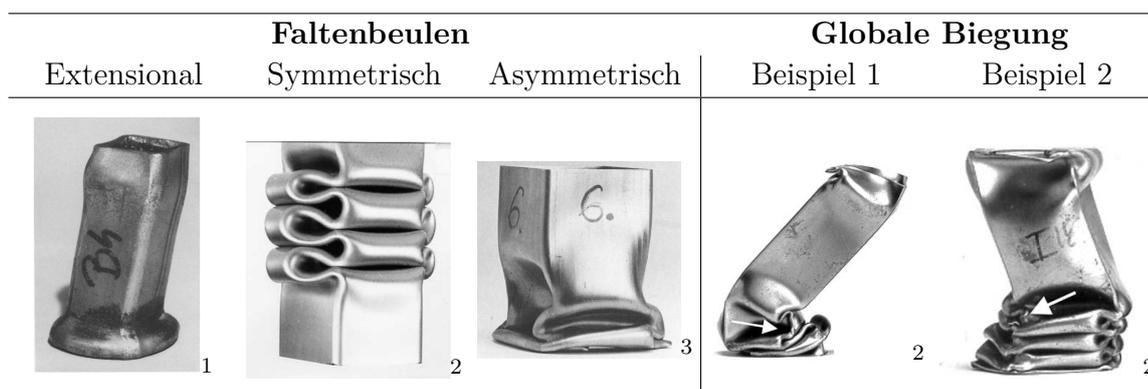


Abbildung 2–11: Beispiele für verschiedene Deformationsformen quadratischer Profile unter axialer Belastung (Bilder aus ¹(Abramowicz und Jones 1986), ²(Abramowicz 2003) und ³(Abramowicz und Jones 1984b), teilweise gemischte Deformationsformen)

Faltenbeulen wird als eine effiziente (Chen und Wierzbicki 2001), teilweise sogar als effizienteste (Kim 2002; Chen et al. 2005) oder optimale (Abramowicz und Jones 1984b) Form der Energieabsorption bei metallischen Profilstrukturen unter axialer (Crash-)Belastung beschrieben. Es zeichnet sich durch das sequenzielle Ausbilden von Falten aus. Beim Ausbilden der Falten tritt plastische Deformation auf. Üblicherweise schreitet diese Deformation von einem Ende des Profils zum anderen Ende fort (Jones 2012). Nach Abramowicz (2003) tritt beim Faltenbeulen zunächst ein elastisches oder elasto-plastisches Beulen auf. Die darauffolgenden plastischen Deformationen konzentrieren sich anschließend jedoch auf vergleichsweise kleine Gebiete der Profilstruktur, sogenannte Fließgelenke, an welchen der Großteil der plastischen Deformation erfolgt. Der Abstand zwischen dem oberen und dem

unteren Fließgelenk, welches eine Faltung definiert, wird als Wellenlänge bezeichnet (Chen und Wierzbicki 2001; Abramowicz und Jones 1984b).

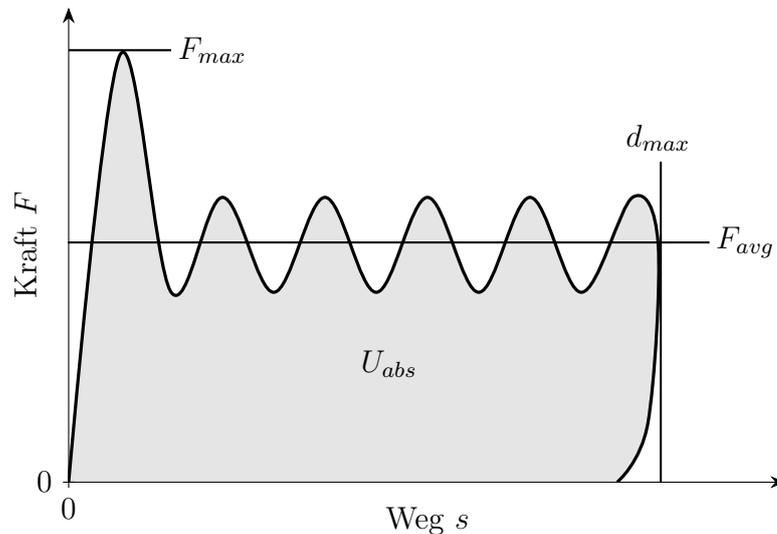


Abbildung 2–12: Idealisierte Kraft-Intrusions-Kurve mit eingezeichneter Maximalkraft (F_{max}), mittlerer Kraft (F_{avg}), maximaler Intrusion (d_{max}) und der absorbierten Energie (U_{abs} , Fläche unter der Kurve)

Abbildung 2–12 zeigt eine idealisierte Kraft-Weg-Kurve einer Profilstruktur, welche in einem Komponententest unter dynamischer axialer Belastung mittels Faltenbeulen deformiert. Kennzeichnend ist häufig eine initiale Kraftspitze F_{max} , welche zum Ausformen der ersten plastischen Faltung führt. Im Falle einer stoßartigen Belastung ist diese Kraftspitze in der Regel von der Spannungswelle, welche an den beteiligten Massen (oder idealisierten Einspannungen in der Simulation) reflektiert wird, abhängig (Schumacher 2020). Die aus der Spannungswelle resultierende Kraft ist von der impaktierten Fläche A , der Dichte des Materials ρ , der Schallgeschwindigkeit des Materials c sowie der Stoßgeschwindigkeit v_0 abhängig (Schwanitz 2016). In Abhängigkeit von Profilgeometrie, Materialeigenschaften und Lastfall (Belastungsgeschwindigkeit, Belastungswinkel) können weitere Faktoren eine Rolle bei der Ausbildung der initialen Kraft spielen.

Auf die initiale Kraftspitze folgt ein oszillierender Kraft-Weg-Verlauf. Die einzelnen Perioden korrelieren dabei nach Jones (2012) mit dem Ausformen der einzelnen Faltungen. Der Weg s bis zur elastischen Rückfederung wird als maximale Intrusion d_{max} bezeichnet. Die Fläche unter der Kurve ist die absorbierte Energie

$$U_{abs} = \int_0^{d_{max}} F(s) ds \quad . \quad (2-9)$$

Weitere gebräuchliche Kennzahlen zur Charakterisierung der Crasheigenschaften einer Profilstruktur sind die mittlere Kraft

$$F_{avg} = \frac{U_{abs}}{d_{max}} \quad (2-10)$$

sowie die spezifische Energieabsorption SEA , welche die absorbierte Energie U_{abs} auf die Masse der Struktur m bezieht:

$$SEA = \frac{U_{abs}}{m} \quad (2-11)$$

Die *Crush Force Efficiency* (CFE) beschreibt das Verhältnis aus mittlerer und maximaler Kraft:

$$CFE = \frac{F_{avg}}{F_{max}} \quad (2-12)$$

Unter einer idealen Crashstruktur wird häufig eine Struktur mit einem konstanten Kraft-Weg-Verlauf angesehen (Jones 2012). Der Wert für die *Crush Force Efficiency* liegt folglich bei 1. Die SEA und die CFE sind dabei insbesondere im akademischen Bereich gebräuchliche Kennwerte. Für praktische Aufgabenstellungen in der Automobilindustrie werden sie in der Regel nicht eingesetzt, da die Anforderungen in der Regel hinsichtlich anderer Kennwerte (z.B. Intrusionen oder maximale Kräfte) formuliert sind und die Profilstrukturen in Kombination mit den umliegenden Komponenten im Gesamtsystem funktionieren müssen.

Abbildung 2–13 zeigt exemplarische Kraft-Weg-Kurven schräg-axial belasteter Profilstrukturen. Das theoretische Optimum der Energieabsorption bei vorgegebener Maximalkraft und Intrusion wird von realen Strukturen unter axialer wie auch schräg-axialer Crashbelastung in der Regel nicht erreicht. Aufgrund der schrägen Lasteinleitung, welche zu einer kleineren initial impaktierten Fläche führt, weisen dynamisch schräg belastete, faltenbeulende Profilstrukturen häufig keine ausgeprägte initiale Kraftspitze auf. Sie verfügen jedoch weiterhin über gute Energieabsorptionseigenschaften. Gleichzeitig ist es in realen Strukturen schwer diese Deformationsform zu erreichen (Chen et al. 2005).

Tritt hingegen globale Biegung auf, fällt das Kraftniveau nach einem anfänglichen Anstieg üblicherweise stark ab (Han und Park 1999). Die kinetische Energie wird somit nicht mittels Faltenbeulen durch die Profilstruktur absorbiert. Bei dynamischen Komponententests (z.B. Fallturm) führt das in der Regel dazu, dass es

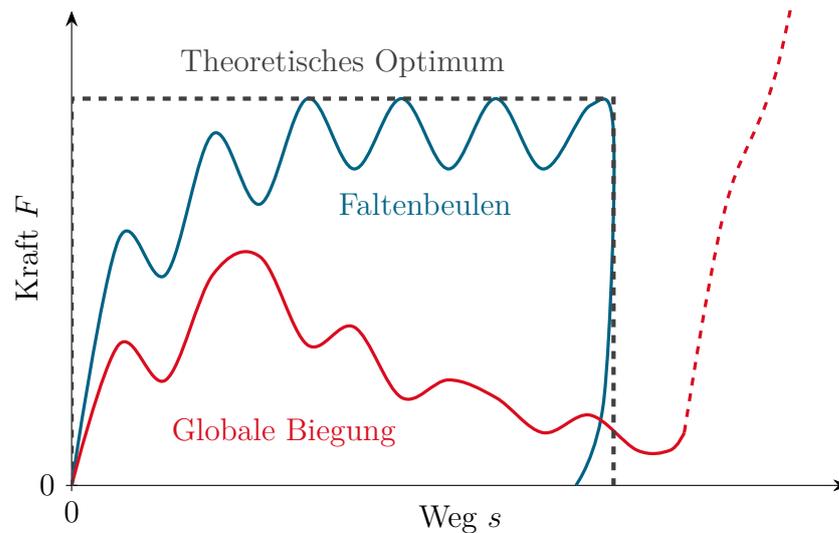


Abbildung 2–13: Exemplarische Kraft-Weg-Kurven für unterschiedliche Deformationsformen einer Profilstruktur unter schräger Crashbelastung; theoretisches Optimum bei vorgegebenen Maximalwerten für Kraft und Weg

zu einem unerwünschten Kraftanstieg kommt, wenn das Profil oder Teile davon auf Blockmaß komprimiert werden oder der Impaktor auf die Einspannung aufschlägt. Bei realen Fahrzeugstrukturen kann es dadurch zu unkontrollierten Deformationen oder einer Schädigung nachgeschalteter Strukturkomponenten kommen.

Zu der in Abbildung 2–11 dargestellten extensionalen Deformationsform ist anzumerken, dass diese das höchste Kraftniveau aufweist, in realen Strukturen jedoch nur selten bzw. nur unter bestimmten Bedingungen (z.B. Wandlängen/Wanddicken-Verhältnissen oder bestimmten Werkstoffen) auftritt. Üblicherweise geht sie zudem nach wenigen Falten in eine andere Deformationsform über (Abramowicz und Jones 1986; Langseth und Hopperstad 1996). Aufgrund von idealer Modellierung tritt die extensionale Deformationsform gehäuft in Crashsimulationen auf. In Versuchen werden hingegen überwiegend symmetrische und asymmetrische Deformationsformen beobachtet. Unter anderem aus diesem Grund wird bei der Simulation von axial belasteten Profilstrukturen in der Literatur häufig mit geometrischen Imperfektionen gearbeitet, um eine bessere Übereinstimmung mit Versuchsergebnissen zu erreichen.

2.2.2 Forschungsarbeiten zu Ein- und Mehrkammer-Profilen

Der nachfolgende Abschnitt soll einen Überblick über Forschungsarbeiten zu axial belasteten Profilstrukturen geben. Der Fokus liegt dabei auf metallischen Ein-

und Mehrkammer-Profilen mit konstantem Querschnitt. Umfangreiche Übersichtsarbeiten zu dünnwandigen energieabsorbierenden Strukturen sind von Alghamdi (2001), Jones (2012) und Baroutaji et al. (2017) veröffentlicht worden.

Erste empirische Formeln zur näherungsweise Berechnung der mittleren Deformationskraft bei zylindrischen Profilen und deren Abgleich mit experimentellen Untersuchungen an Stahlrohren wurden von Alexander (1960) vorgestellt. Abramowicz und Jones (1984a) erweitern den Ansatz von Alexander (1960) unter Berücksichtigung weiterer Faltenbeulformen bei zylindrischen Profilen und der Berücksichtigung dynamischer Effekte. Grundlage dafür sind umfangreiche experimentelle Untersuchungen mit Stahlrohren.

In (Abramowicz und Jones 1984b) werden zudem experimentelle Untersuchungen und Berechnungsansätze für quadratische Profilstrukturen vorgestellt. Hervorzuheben ist hierbei die Beschreibung grundlegender Deformationselemente und vielfältiger Deformationsformen bei quadratischen Profilstrukturen (vgl. Abbildung 2–11). Abramowicz und Jones (1986) erweitern die zuvor genannten experimentellen Untersuchungen und theoretischen Betrachtungen. In (Abramowicz 2003) ist zudem eine Zusammenfassung zum *Superfolding Element* Konzept gegeben, welches das komplexe Deformationsverhalten einer Profilstruktur durch ein Zusammensetzen einfacher Deformationselemente, den sogenannten *Superfolding Elementen*, beschreibt.

Langseth und Hopperstad (1996) führen experimentelle Untersuchungen an quadratischen Aluminiumprofilen unter quasi-statischer und dynamischer Belastung durch. Dabei stellen sie fest, dass bei quasi-statischer Belastung überwiegend symmetrische Deformationsformen, bei dynamischer Belastung hingegen verschiedenste Deformationsformen auftreten können. Zudem ist die mittlere Deformationskraft in dynamischen Untersuchungen signifikant höher als bei quasi-statischer Belastung. Je nach Wärmebehandlung der Aluminiumlegierung können zudem extensionale Deformationsformen festgestellt werden. Diese gehen jedoch nach ein bis zwei Falten in eine andere Deformationsform über.

Zhang et al. (2014) untersuchen quadratische Profilstrukturen mit gestufter Wanddicke im Querschnitt. Die Wanddicke nimmt dabei in Richtung der Profilecken im Querschnitt zu. In experimentellen Untersuchungen und Simulationen wird gezeigt, dass die spezifischen Energieabsorptionseigenschaften durch diese Maßnahmen verbessert werden können.

Rossi et al. (2005) simulieren den Einfluss verschiedener Außengeometrien auf das Deformationsverhalten von Aluminium-Profilstrukturen unter dynamischer

Belastung. Untersucht werden dabei quadratische, sechseckige und achteckige Profile. Die Anzahl der Wände hat dabei einen direkten Einfluss auf die mittlere Deformationskraft sowie die maximale Intrusion, wobei die mittlere Deformationskraft mit zunehmender Wandanzahl ansteigt, während die Intrusion abnimmt. Die größten Verbesserungen konnten durch zusätzliche Ecken der Außengeometrie in den Untersuchungen bei den Profilen mit der geringsten Wanddicke ermittelt werden.

Der Einfluss der Profillänge auf den Übergangsbereich von Faltenbeulen zu globaler Biegung (bzw. einer gemischten Deformationsform) wird von Fyllingen et al. (2012) an quadratischen Aluminiumprofilen unter axialer Crashbelastung in Experimenten untersucht. Dabei werden, im Vergleich zu den bisher vorgestellten Untersuchungen, wesentlich längere und damit schlankere Profile eingesetzt. Der Übergang zur globalen Biegung liegt in einer, mit fortschreitender Faltenbeuldeformation anwachsenden, Exzentrizität begründet. Der Anteil an Profilen, die eine Biegedeformation aufweist, nimmt mit steigender Profillänge zu.

Han und Park (1999) analysieren das Deformationsverhalten von quadratischen Stahlprofilen unter verschiedenen Belastungswinkeln. Dabei werden drei wesentliche Winkelbereiche festgestellt. Es gibt einen Bereich, in dem eine Faltenbeulform dominiert, einen Bereich, in dem eine Biegeform dominiert sowie einen Zwischenbereich, welcher durch einen bestimmten kritischen Winkel charakterisiert ist. Dieser Winkel hängt in den vorgestellten Untersuchungen im Wesentlichen vom Verhältnis der Profillänge zur Profildicke ab. In den vorgestellten Untersuchungen reduziert sich die mittlere Deformationskraft bei Winkeln, die über dem kritischen Winkel liegen, um ca. 40 %.

Reyes et al. (2002) untersuchen quadratische Aluminiumprofile in quasi-statischen Versuchen sowie in quasi-statischen und dynamischen Simulationen. Dabei werden der Belastungswinkel und die Wandstärke des Profils als wichtigste Einflussfaktoren auf die Deformationsform identifiziert. Die Länge des Profils und die Wärmebehandlung des Materials haben ebenfalls einen Einfluss auf die Deformationsform.

Abbildung 2–14 gibt einen Überblick über Forschungsarbeiten zu Mehrkammer-Profilstrukturen unter axialer Belastung. Neben der Abbildung untersuchter Querschnittsgeometrien werden die Arbeiten nach den Belastungsarten und den verwendeten Methoden differenziert. Unter dem Begriff *analytisch* werden dabei Ansätze und Formeln zur näherungsweise Bestimmung von Profilkennwerten zusammengefasst. Hinter dem Begriff *numerisch* stehen im wesentlichen Finite Elemente Simulationen.

Quelle	Querschnitte	Belastung			Methode		
		quasi-stat.	dynamisch	oblique	experimentell	analytisch	numerisch
(Chen und Wierzbicki 2001)		●	○	○	○	●	●
(Kim 2002)		○	●	○	○	●	●
(Zhang et al. 2006)		○	●	○	○	●	●
(Zhang und Cheng 2007)		○	●	○	○	●	●
(Najafi und Rais-Rohani 2011)		●	○	○	○	●	●
(Zhang und Zhang 2013)		●	○	○	●	●	●
(Alavi Nia und Parsapour 2014)		●	○	○	●	○	●
(Zhang und Zhang 2014)		●	○	○	●	●	●
(Jusuf et al. 2015)		○	●	○	●	○	●
(Pirmohammad und Marzdashti 2016)		●	○	●	○	○	●
(Chen et al. 2018)		○	●	○	●	○	●

Abbildung 2–14: Literaturübersicht zur Untersuchung von Mehrkammer-Profilstrukturen unter (vorwiegend) axialer Belastung (ausgewählte Quellen und Querschnitte)

Chen und Wierzbicki (2001) zeigen auf, dass Zwei- und Dreikammer-Profile eine bessere spezifische Energieabsorption als Einkammer-Profile haben. Die Unterschiede zwischen den Zwei- und Dreikammer-Profilen bezüglich der spezifischen Energieabsorption sind jedoch gering. Das Füllen der Kammern mit Aluminiumschaum erhöht zudem die spezifische Energieabsorption.

In der Arbeit von Kim (2002) wird eine neuartige Mehrkammer-Profilstruktur vorgestellt und mit Ein-, Zwei-, Drei und Vierkammer-Profilstrukturen verglichen. Die Idee basiert darauf, dass kleine Kammern in die Ecken eines quadratischen Profilquerschnitts eingebracht werden. Das spezifische Energieabsorptionsvermögen der neuen Aluminiumstrukturen unter Crashbelastung ist bis um den Faktor 1.9 höher als bei einem quadratischen Einkammer-Profil. Auch im Vergleich zu den anderen Mehrkammer-Strukturen können signifikante Verbesserungen erreicht werden.

Zhang et al. (2006) und Zhang und Cheng (2007) zeigen, dass Gitterstrukturen die spezifischen Energieabsorptionseigenschaften verbessern. Dabei sind Gitterstrukturen besser als mit Aluminiumschaum gefüllte Einkammer-Strukturen. Zudem verbessern sich die Energieabsorptionseigenschaften mit zunehmender Kammeranzahl. Weiter sind bitubulare Profilstrukturen (Najafi und Rais-Rohani 2011; Jusuf et al. 2015; Pirmohammad und Marzdashti 2016) und Kreuzstrukturen (Alavi Nia und Parsapour 2014; Zhang und Zhang 2014) vorteilhaft hinsichtlich der spezifischen Energieabsorptionseigenschaften (vgl. auch Abbildung 2–14).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Mehrkammer-Strukturen unter axialer Belastung in der Regel bessere spezifische Energieabsorptionseigenschaften als Einkammer-Profile haben. Vorteilhaft sind dabei häufig Strukturen, bei welchen die Wandlängen im Profilquerschnitt reduziert und neue Wandknotenpunkte oder Ecken eingebracht werden. Herausragende Eigenschaften hat dabei insbesondere der Ansatz von Kim (2002). Die in der Literatur untersuchten Querschnittstopologien weisen jedoch zumeist regelmäßige oder symmetrische Eigenschaften auf.

2.2.3 Triggermechanismen

In der Automobilindustrie sind Triggermechanismen Stand der Technik, um bei axial belasteten Crashstrukturen (z.B. Crashboxen und Längsträgern) die Crashcharakteristik zu modifizieren und ein definiertes und robustes Crashverhalten unter verschiedenen Randbedingungen zu erzeugen (Chen et al. 2005). Unter

dem Begriff Trigger bzw. Triggermechanismen werden in der Regel geometrische Maßnahmen in Form von gewollten Imperfektionen verstanden (Beeh 2015).

Eine umfangreiche Literaturübersicht zu Triggermechanismen bietet (Yuen und Nurick 2008). Diese Arbeit beschreibt Untersuchungen zu Triggern, welche auf lokalen geometrischen und materiellen Modifikationen basieren. Dazu zählen unter anderem das Vorbeulen der Struktur, Eckverprägungen, Flankenverprägungen, umlaufende Verprägungen, Anfasungen, Ausschnitte an Ecken und Flanken, Wellen- und weitere Muster. Kröger (2002) beschreibt zudem sog. Kri-, Bevel und Tulip-Trigger, welche die Querschnittsfläche der Profilstrukturen auf der impaktierten Seite reduzieren und hierdurch die Crashcharakteristik beeinflussen. Abbildung 2–15 gibt eine Übersicht über Varianten der Triggerung.

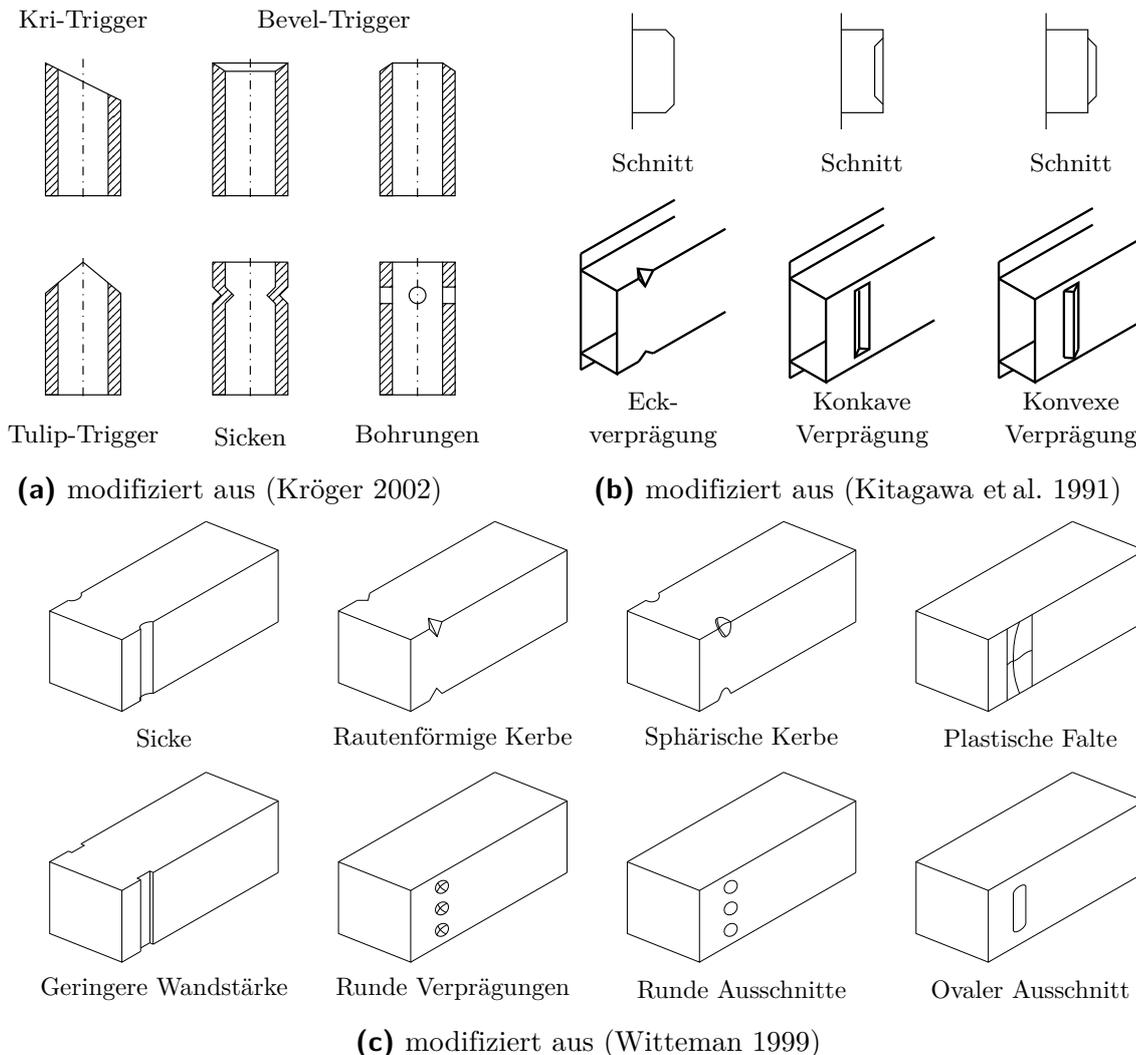


Abbildung 2–15: Ausgewählte Varianten der Triggerung

Als gemeinhin vorteilhaft wird beschrieben, dass Trigger die Anfangskraftspitze F_{max} reduzieren (Du Bois et al. 2004). Dieser reduzierende Effekt kann jedoch (insbesondere bei der Simulation von ideal modellierten, dynamischen Komponentenversuchen ohne Impaktorneigungswinkel) durch die, aus der initialen Spannungswelle resultierende, Kraftspitze zunichte gemacht werden (vgl. Abschnitt 2.2.1).

Witteman (1999) untersucht mit FE-Simulationen verschiedene Triggermechanismen bei dynamisch belasteten quadratischen Aluminium-Strangpressprofilen. Dazu gehören verschiedene Verprägungen an den Profilwänden und den Profilecken sowie Anfasungen und Ausschnitte. Insbesondere Modifikationen der Profilecken führen zu einer instabileren Deformationsform. Verprägungen auf der Profilwand, auch Sicken genannt, führen hingegen zur größten festgestellten Reduzierung der Anfangskraftspitze, der gleichmäßigsten Kraft-Weg-Kurve sowie einer stabilen Deformationsform.

Wand- und Eckverprägungen werden u.a. in (Schriever 1990; Kitagawa et al. 1991; Lee et al. 1999) untersucht. Es werden eine verbesserte Energieabsorption, geringere Kraftspitzen und ein kontrolliertes Crashverhalten beschrieben. Chen et al. (2005) sowie Alavi Nia und Parsapour (2014) beschreiben Ausschnitte auf den Profilwänden und -ecken. Die Form der Ausschnitte hat dabei einen geringeren Einfluss auf das Deformationsverhalten als die Größe oder der Ort der Ausschnitte. Zudem wird ein reduzierter Anfangskraftpeak wie auch eine geringere Neigung zur globalen Biegung bei schräg-axialer Belastung (oblique) als bei ungetriggerten Profilen beschrieben.

Anfasungen werden in (El-Hage et al. 2005) am impaktierten Profilende und in (DiPaolo und Tom 2006) auf den Profilwänden beschrieben. Die Anfasungen am Profilende haben dabei einen großen Einfluss auf die initiale Kraft, jedoch beeinflussen sie die mittlere Kraft nicht signifikant. Dennoch werden die Kraft-Weg-Kurve und die Deformationsform durch die Anfasungen beeinflusst. DiPaolo und Tom (2006) stellen fest, dass sich Anfasungen auf Profilwänden gut eignen, um Faltenbeulen zu initiieren.

2.3 Grundlagen der Strukturoptimierung

Nachfolgend wird eine Einführung in die Grundlagen der Strukturoptimierung gegeben. Die Erläuterungen folgen dabei sinngemäß den Ausführungen von Schumacher (2020), Ortmann (2015) und Kacprzyk et al. (2011).

2.3.1 Wesentliche Arten und Begriffe der Strukturoptimierung

Ziel der Strukturoptimierung ist es die Eigenschaften von mechanischen Strukturen zu verbessern und vorzugsweise ein Optimum zu erreichen. Unter einem Optimum wird in dieser Arbeit das beste erreichbare Resultat im Sinne einer bestimmten Funktion, eines Wertes oder einer Eigenschaft verstanden (Ortmann 2015). Weiter wird unter dem Begriff der Optimierung die automatisierte Suche nach dem Optimum mit mathematischen oder heuristischen Ansätzen sowie anderen algorithmierbaren Methoden verstanden (Ortmann 2015). Diese Definition ist insbesondere als eine Abgrenzung zum manuellen Verbessern durch Ausprobieren zu verstehen. In Tabelle 2–1 sind wesentliche Begriffe der Strukturoptimierung aufgeführt und erklärt.

Abbildung 2–16 zeigt den typischen Ablauf einer Strukturoptimierung. Nach Schumacher (2020) ist der wesentliche Bestandteil einer Optimierungssoftware die Kopplung eines Analysemodells mit einem Optimierungsalgorithmus, welcher die Entwurfsvariablen derart verändert, dass die Eigenschaften der zu optimierenden Struktur verbessert werden. Diese Schleife aus Analysemodell und Optimierungsalgorithmus wird so lange durchlaufen, bis ein Abbruchkriterium erreicht bzw. ein Optimum gefunden wird.

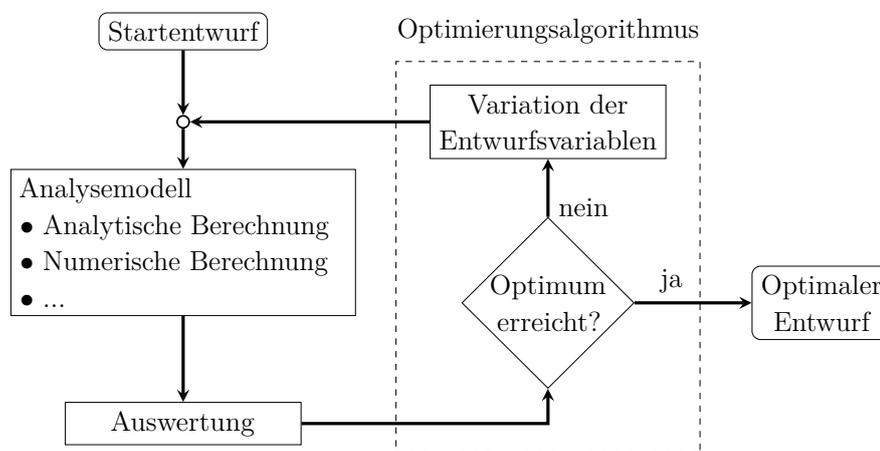


Abbildung 2–16: Ablauf einer Optimierungsschleife (modifiziert aus (Schumacher 2020))

Die Strukturoptimierungsaufgaben zum Finden der optimalen Geometrie einer Struktur unterteilen Bendsoe und Sigmund (2004) in drei verschiedene Arten: die Dimensionierung, welche üblicherweise die optimale Dickenverteilung zum Ziel hat; die Formoptimierung, welche die optimale Ausgestaltung einer vorgegebenen Topologie anstrebt; die Topologieoptimierung, welche die optimale Anzahl, Anordnung und Form von Merkmalen wie Löcher in der Struktur zum Ziel hat.

Tabelle 2–1: Wesentliche Begriffe der Strukturoptimierung
(modifiziert aus (Schumacher 2020; Ortman 2015))

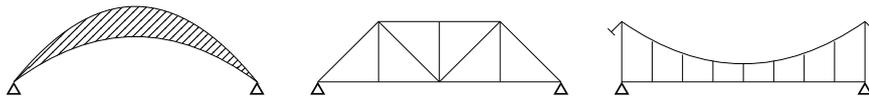
Optimierungsalgorithmus	Mathematisches Verfahren zur Minimierung einer Zielfunktion mit oder ohne Berücksichtigung von Restriktionen
Optimierungsverfahren	Zusammenstellung der Optimierungsansätze und Optimierungsalgorithmen zur Lösung von Optimierungsaufgaben
Optimierungsstrategie	Vorgehensweise zur Reduktion komplexer Optimierungsaufgaben auf einfache Ersatzprobleme, die mit einem Optimierungsalgorithmus zu lösen sind
Optimierungsmethode	Kombination von Optimierungsstrategie und Optimierungsalgorithmus, um das Werkzeug der Strukturoptimierung auf reale mechanische Fragestellungen anwenden zu können
Optimierungsproblem/-aufgabe	Zusammenfassung der Zielfunktionen, Restriktionen und Entwurfsvariablen in einer geschlossenen Problembeschreibung
Zielfunktion(en)	Mathematische Formulierung eines oder mehrerer Struktur- bzw. Auslegungsziele
Restriktionen	Mathematisch formulierte Forderungen an die Struktur (einzuhaltende Bedingungen)
Analysemodelle	Mathematische Beschreibung der Modelleigenschaften (In der Strukturmechanik ist es das Strukturmodell, allgemein kann es auch als Simulationsmodell bezeichnet werden.)
Strukturantwort	Mathematische Beschreibung einer Eigenschaft, eines Parameters oder einer Funktion der zu optimierenden Struktur wie z.B. der Masse
Funktionsaufruf	Der Aufruf aller Analysemodelle zur Bestimmung der Strukturantworten nach einer Änderung der Entwurfsvariablen (In der Strukturoptimierung kann ein Funktionsaufruf z.B. die Simulation aller Lastfälle mit FE-Modellen sein.)
Entwurfsvariablen	Zu variierende Strukturgrößen
Entwurfsraum	Bereich, in dem die Optimierung durchgeführt werden soll (Er wird in der Regel durch die Festlegung der unteren und oberen Grenzen der Entwurfsvariablen festgelegt.)
Startentwurf	Startwerte der Entwurfsvariablen

Basierend auf Schmit und Mallett (1963) unterscheidet Schumacher (2020) ebenfalls nach Dimensionierung, Formoptimierung und Topologieoptimierung. Zusätzlich werden die Wahl der Bauweise und die Wahl der Materialeigenschaften als weitere Strukturoptimierungsaufgaben angesehen (vgl. Abbildung 2–17). Die Unterscheidung der verschiedenen Strukturoptimierungsaufgaben basiert bei Schumacher (2020) auf der Art der Entwurfsvariablen.

Die in der Dimensionierung auftretenden Wanddicken und Querschnitte sind nach Schumacher (2020) die am einfachsten zu handhabenden Entwurfsvariablen. In der Formoptimierung hingegen beschreiben die Entwurfsvariablen die Form des

Bauteilrandes. Die Entwurfsvariablen in der Topologieoptimierung beschreiben die Lage und Anordnung von Strukturelementen. Die Topologieoptimierung kann auch als „verbessernde Transformation in eine andere Topologiekategorie“ (Schumacher 2020) definiert werden. Weiter kann auch die Wahl der Materialeigenschaften (z.B. Aluminium, Stahl oder Verbundwerkstoffe) sowie die Wahl der Bauweise (z.B. Vollwandträger, Fachwerkstruktur oder Verbundstruktur) mit entsprechenden Entwurfsvariablen beschrieben werden.

Wahl der Bauweise:



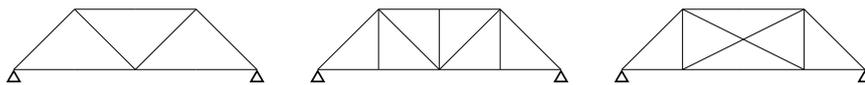
Wahl der Materialeigenschaften:

Aluminium

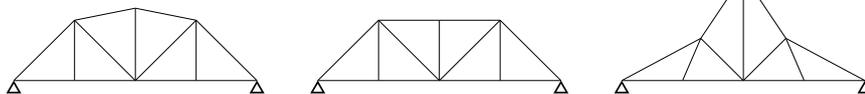
Stahl

Verbundwerkstoffe

Topologieoptimierung:



Formoptimierung:



Dimensionierung:

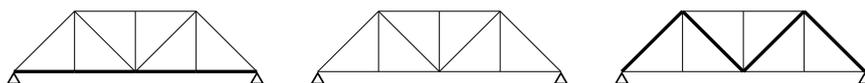


Abbildung 2–17: Klassifizierung von Strukturoptimierungsaufgaben nach der Art der Entwurfsvariablen (modifiziert aus (Schumacher 2020))

2.3.2 Mathematische Formulierung eines Optimierungsproblems

Aus mathematischer Sicht kann ein Optimierungsproblem als die Suche nach dem Minimum f^* der Zielfunktion f beschrieben werden (vgl. Gleichung 2–13). Die Zielfunktion ist dabei vom Vektor der Entwurfsvariablen \mathbf{x} abhängig. Der optimale Satz an Entwurfsvariablen ist mit \mathbf{x}^* gegeben.

$$f^* = f(\mathbf{x}^*) = \min_{\mathbf{x}}(f(\mathbf{x})) \quad (2-13)$$

Bei der Minimierung der Zielfunktion müssen in Abhängigkeit vom Optimierungsproblem üblicherweise bestimmte Restriktionen eingehalten werden. Nach Schumacher (2020) lassen sich diese in drei Kategorien einteilen:

$$g_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad \text{mit } j = 1 \dots J \quad (\text{Ungleichheitsrestriktion}) \quad (2-14)$$

$$h_k(\mathbf{x}) = 0 \quad \text{mit } k = 1 \dots K \quad (\text{Gleichheitsrestriktion}) \quad (2-15)$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad \text{mit } i = 1 \dots I \quad (\text{explizite Restriktion}) \quad (2-16)$$

In der Strukturoptimierung sind Gleichheitsrestriktionen und Ungleichheitsrestriktionen Restriktionen für die Strukturantworten, welche von den Entwurfsvariablen abhängen. Ein Beispiel für eine Gleichheitsrestriktion ist die Masse der Struktur, welche sich nicht verändern darf. Die Definition einer maximal erlaubten Strukturmasse ist hingegen eine Ungleichheitsrestriktion. Ober- und Untergrenzen für einzelne Entwurfsvariablen (z.B. eine Wanddicke) werden als explizite Restriktionen bezeichnet.

Ob und wie schnell ein mathematischer Optimierungsalgorithmus ein Optimum findet, hängt von den Eigenschaften der zu berücksichtigenden Zielfunktion und Restriktionen ab (Schumacher 2020). Zielfunktionen können hochgradig nichtlinear sein und über mehrere lokale Minima verfügen (vgl. Abbildung 2–18 (a)). Viele Optimierungsalgorithmen und insbesondere gradientenbasierte Verfahren sind bei solchen Funktionseigenschaften nicht in der Lage zuverlässig das globale Minimum zu finden. Konvexe Funktionen (vgl. Abbildung 2–18 (b)) oder Funktionen, welche im zulässigen Bereich konvexe Eigenschaften haben, verfügen über nur ein Minimum, welches in der Regel zuverlässig gefunden wird. Zielfunktionen oder Restriktionsfunktionen mit nicht-konvexen Eigenschaften (vgl. Abbildung 2–18 (c)) erschweren die Suche nach dem globalen Minimum und erfordern geeignete Optimierungsalgorithmen (Schumacher 2020).

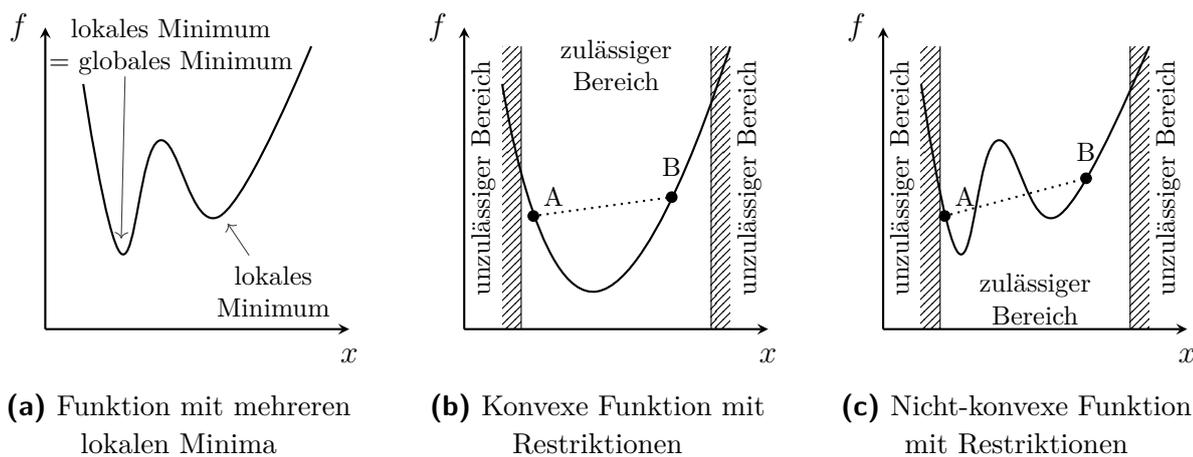


Abbildung 2-18: Verschiedene Zielfunktionen ohne und mit Restriktionen (modifiziert aus (Schumacher 2020))

2.3.3 Klassifizierung von Optimierungsalgorithmen

Die Wahl eines geeigneten Optimierungsalgorithmus hängt von der Art des Optimierungsproblems ab. Die Anzahl der in der Literatur oder in Softwareprogrammen zur Verfügung stehenden Optimierungsalgorithmen ist sehr groß. Schumacher (2020) spricht von deutlich über 1000 verschiedenen Softwareprogrammen. Jedoch gibt es keinen für alle Optimierungsprobleme universell geeigneten Algorithmus (vgl. No-Free-Lunch-Theoreme von Wolpert und Macready (1997)). Kacprzyk et al. (2011) zählen verschiedene Möglichkeiten der Klassifizierung auf. Diese sind in Abbildung 2-19 dargestellt.

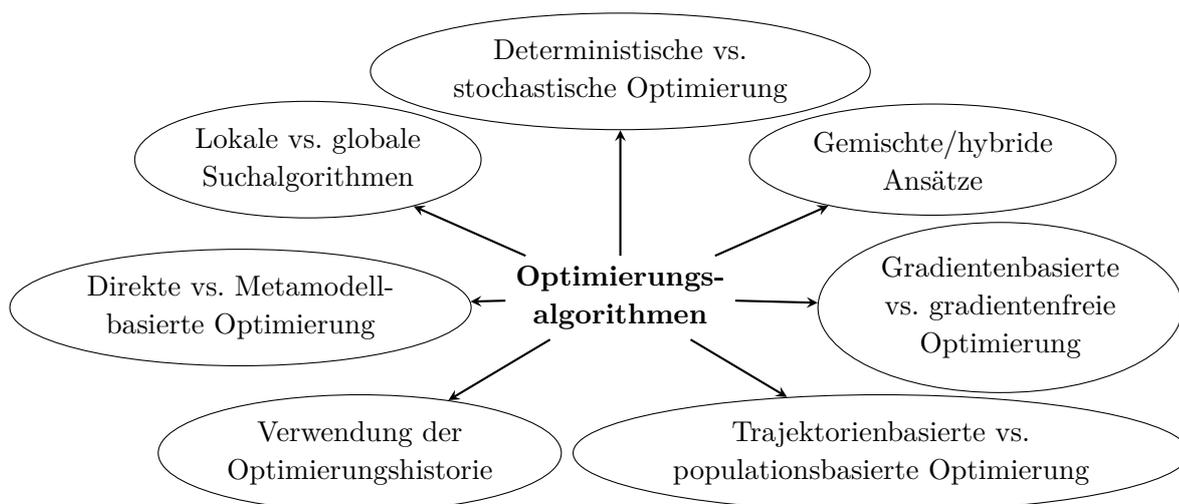


Abbildung 2-19: Möglichkeiten zur Klassifizierung von Optimierungsalgorithmen nach (Kacprzyk et al. 2011)

Typische Beispiele für ein gradientenbasiertes Optimierungsverfahren sind nach Kacprzyk et al. (2011) die *Methode des steilsten Abstiegs* oder das *Gauss-Newton-Verfahren*. Aber auch zur Topologieoptimierung von linear-statisch belasteten Strukturen werden sensitivitätsbasierte Methoden (z.B. *Homogenisierungsmethode* oder SIMP-Methode (*Solid Isotropic Material with Penalization*)) eingesetzt (Bendsøe und Sigmund 2004). Charakteristisch für diese Methoden ist eine (partielle) Ableitung der Zielfunktionen und Restriktionen nach den Entwurfsvariablen (Schumacher 2020). Bei nicht-konvexen Optimierungsproblemen neigen gradientenbasierte Verfahren dazu lediglich lokale Optima zu finden (Kacprzyk et al. 2011).

Genetische (GA) und *evolutionäre Algorithmen (EA)* sind hingegen gradientenfreie, stochastische Optimierungsverfahren mit einer globalen Suchstrategie, welche eine biologische Evolution nachbilden und aufgrund der Verwendung dieser Regeln auch als (meta-)heuristische Optimierungsverfahren bezeichnet werden (Kacprzyk et al. 2011). Bei der evolutionären Optimierung werden in der Regel drei stochastische Operatoren eingesetzt: Rekombination, Mutation und Selektion. Die Individuen der Elterngeneration werden zu neuen Individuen rekombiniert, welche sich wiederum durch Mutationen verändern können. Die Selektion führt dazu, dass nur die besten Individuen einer Generation ihre Eigenschaften an die nächste Generation weitergeben dürfen (Schumacher 2020).

Metamodell-basierte Optimierungsalgorithmen führen die Optimierung in der Regel auf Basis einer Approximation der Ziel- und Restriktionsfunktionen aus. Beispiele für Approximationsfunktionen sind dabei Polynome, Gauß-Prozesse bzw. das Kriging, radiale Basisfunktionen oder neuronale Netze (Schumacher 2020). Eine Metamodell-basierte Optimierungsmethode ist die *Successive Response Surface Method* (SRSM), welche u.a für die Optimierung von Crashstrukturen entwickelt wurde (Stander und Craig 2002; Stander et al. 2015). Das Metamodell wird in einem Unterbereich des Entwurfsraums auf Basis der Stützstellen eines Versuchsplans aufgebaut. Die Optimierung selbst findet mit konventionellen Algorithmen (z.B. gradientenbasierten oder evolutionären Algorithmen) auf dem Metamodell statt. In jeder folgenden Iteration wird das Metamodell sukzessive auf Basis einer Verschiebung und Veränderung des Unterbereichs angepasst, um den Bereich um das vermutete Optimum besser abbilden zu können.

2.3.4 Herausforderungen bei der Optimierung von Crashstrukturen

Die Optimierung crashbelasteter Strukturen ist von besonderen Herausforderungen geprägt. Zum einen führen die in der Crashesimulation übliche Nichtlinearitäten bezüglich der Materialeigenschaften, der Verschiebungen und Rotationen sowie von Randbedingungen (z.B. Kontakt) (vgl. Abschnitt 2.1.3) in der Regel dazu, dass die Funktionen der Strukturantworten in Abhängigkeit von den Entwurfsvariablen nicht-konvex sind und die Zielfunktionen üblicherweise über eine Vielzahl an lokalen Optima verfügen (Ortmann 2015). Hinzu kommen besondere Ziel- und Restriktionsfunktionen wie beispielsweise das beschleunigungsbasierte HIC-Kriterium (Ortmann 2015). Numerisches Rauschen und unrobustes Strukturverhalten aufgrund von Verzweigungspunkten erschweren die Suche nach dem globalen Optimum zusätzlich (Schumacher 2020).

Aufgrund der in Abschnitt 2.1.3 vorgestellten expliziten Zeitintegration können Sensitivitäten, also die Ableitungen der Ziel- und Restriktionsfunktionen nach den Entwurfsvariablen, nicht mehr analytisch bestimmt werden (Ortmann 2015). Erste Ansätze zum Lösen dieses Problems existieren (Weider und Schumacher 2019), sind jedoch aktuell nur begrenzt anwendbar. Eine numerische Ermittlung der Sensitivitäten ist prinzipiell möglich, aufgrund von zusätzlich notwendigen Funktionsaufrufen in der Regel aber nicht praktikabel (Ortmann 2015). Folglich ist eine Verwendung von gradientenbasierten Optimierungsverfahren bei typischen Craschanwendungen nicht zielführend.

Besser geeignet sind dagegen Optimierungsverfahren mit einer globalen Approximation der Ziel- und Restriktionsfunktionen. Diese Verfahren sind in der Regel jedoch rechenintensiv, sodass eine gute Approximation bei einer Optimierung von Strukturen mit vielen Entwurfsvariablen üblicherweise nicht erreichbar ist (Schumacher 2020). Ursache hierfür ist unter anderem der Ressourcenbedarf von Gesamtfahrzeug-Crashesimulationen, bei der eine einzelne Crashesimulation auf einem Großrechner (High Performance Cluster - HPC) länger als 12 Stunden dauern kann. Eine Übersicht zu Optimierungsansätzen für Crashstrukturen ist in (Fang et al. 2017) aufgeführt.

Insbesondere aufgrund der großen Anzahl an Entwurfsvariablen und der Problematik bei der Ermittlung der Sensitivitäten sind herkömmliche Methoden, wie sie zur Topologieoptimierung von linear-statisch belasteten Strukturen eingesetzt werden (z.B. die SIMP-Methode (Bendsøe und Sigmund 2004)), für die Topologieoptimierung von Crashstrukturen nicht anwendbar.

2.4 Forschungsarbeiten zur Topologieoptimierung von Crashstrukturen

Aufgrund der im vorangegangenen Abschnitt aufgezeigten Herausforderungen gibt es zahlreiche Forschungsaktivitäten, um neue Optimierungsmethoden für die Topologieoptimierung von nichtlinear dynamisch belasteten Crash-Strukturen zu entwickeln. Der *Ground Structure Approach* (GSA), die *Hybrid Cellular Automata* (HCA), die *Equivalent Static Loads Method* (ESLM), die *Evolutionary Level Set Method* (EA-LSM) sowie die *Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung* (GHT) sind ausgewählte Vertreter. Viele dieser Methoden können für verschiedenste Optimierungsprobleme eingesetzt werden. Die nachfolgenden Erläuterungen beziehen sich jedoch im Wesentlichen auf ihre Verwendung zur Topologieoptimierung von Crashstrukturen. Ein Fokus der Literaturrecherche ist die Topologieoptimierung axial belasteter Crashstrukturen. Aufgrund der Komplexität üblicher Optimierungsprobleme bei der Topologieoptimierung von Crashstrukturen ist es bei den vorgestellten Methoden in der Regel unwahrscheinlich, dass ein globales Optimum gefunden wird. Der Begriff der Optimierung ist daher im Sinne einer Verbesserung der Struktureigenschaften und nicht im Sinne des Suchens nach dem optimalen Entwurf zu verstehen. Die folgenden Ausführungen folgen sinngemäß Ortmann et al. (2021).

2.4.1 Ground Structure Approach

Für den *Ground Structure Approach* (Pedersen 2003; Pedersen 2004) wird der Bau- raum mit einer Grundstruktur aus Balkenelementen ausgefüllt. Optimierungsziel ist die Anpassung eines tatsächlichen Beschleunigungs- oder Kraftverlaufs über die Zeit bzw. Verschiebung an einen vorgegebenen Verlauf (Ortmann 2015). Im von Pedersen (2003) vorgestellten Ansatz können die verwendeten Balkenelemente geometrische Nichtlinearitäten abbilden. Zudem verfügen sie über plastische Fließgelenke. Kontaktphänomene werden nicht berücksichtigt, da diese zu numerischen Problemen sowohl bei der impliziten Zeitintegration als auch bei der analytischen Bestimmung der Sensitivitäten im Optimierungsalgorithmus führen.

Vorteilhaft beim GSA ist der vergleichsweise geringe numerische Aufwand durch die Anwendung von impliziter Zeitintegration. Jedoch hängt das Ergebnis stark von der anfänglich gewählten Grundstruktur ab. Topologievariationen, welche sich nicht aus dieser ableiten lassen, kann der Optimierungsalgorithmus nicht finden.

2.4.2 Equivalent Static Loads Method

Optimierungsansätze, welche auf der *Equivalent Static Loads Method* (Park 2011) basieren, konnten auf eine Vielzahl von nichtlinearen (dynamischen) Problemen angewendet werden. Im Fall einer Crashtoptimierung wird unter einer äquivalenten statischen Ersatzlast (Equivalent Static Load) eine statische Last verstanden, welche annähernd das gleiche Verschiebungsfeld wie der nichtlineare dynamische Crashlastfall erzeugt. Der eigentliche Topologieoptimierungsprozess ist ein Zusammenspiel aus einem Analysebereich, in welchem die nichtlinearen dynamischen Simulationen durchgeführt werden und einem Optimierungsbereich, in welchem die Topologieoptimierung unter Verwendung der äquivalenten statischen Ersatzlasten durchgeführt wird (vgl. Abbildung 2–20). In jeder Iteration werden zunächst die nichtlinearen dynamischen Simulationen im Analysebereich durchgeführt. Unter Verwendung des nichtlinearen Verschiebungsfeldes sowie der Steifigkeitsmatrix des Startentwurfs in der Optimierung werden die äquivalenten statischen Ersatzlasten bestimmt, welche dann im Optimierungsbereich für die Topologieoptimierung verwendet werden. Unterschiedliche Zeitpunkte in der dynamischen Simulation können im Optimierungsbereich als verschiedene Lastfälle eingebracht werden. Das Ergebnis der linear-statischen Optimierung wird für die nächste Iteration zurück in den nichtlinear-dynamischen Analysebereich übertragen.

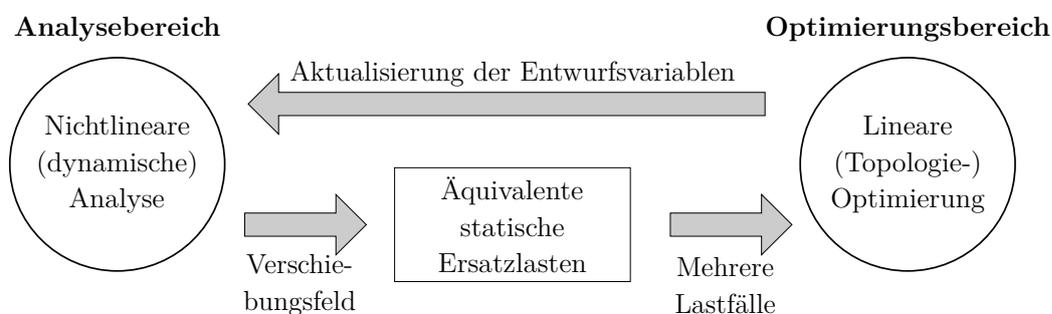


Abbildung 2–20: Optimierungsstrategie der ESLM (modifiziert aus (Park 2011))

Aufgrund der Optimierung mit linear-statischen Strukturantworten kann die ESLM in Bezug auf den Rechenaufwand als effizient eingestuft werden (Ortmann 2015). Problematisch beim in Abbildung 2–20 dargestellten Ansatz ist hingegen, dass bei der ESLM nur Ziel- und Restriktionsfunktionen der linear-statischen FE-Simulation verwendet werden können. Typische Zielgrößen in der Crashtauslegung wie Beschleunigungen oder die Energieabsorption können nicht berücksichtigt werden (Ortmann 2015). Da die äquivalenten statischen Ersatzlasten während der Topologieoptimierung nicht aktualisiert werden, ist zudem nicht sichergestellt, dass die Topologieoptimierung zu einer Optimierung im Sinn des nichtlinearen

dynamischen Lastfalls führt. Dass das nicht zwangsweise der Fall ist, wird in (Stolpe et al. 2018) anhand eines vergleichsweise einfachen Beispiels gezeigt. Zudem werden bei der ESLM einige nichtlineare Effekte wie beispielsweise große Verschiebungen und Rotationen, plastisches Materialverhalten und Stabilitätsprobleme in der linear-statischen Simulation nur unzureichend abgebildet bzw. können zu numerischen Problemen führen (Ortmann 2015). Verschiedene Anwendungen und Variationen der ESLM wurden, unter anderem, um den genannten Problemen zu begegnen, veröffentlicht (Cavazzuti et al. 2011; Duddeck und Volz 2012; Triller et al. 2021).

In (Lee und Park 2015) wird die ESLM zur Optimierung einer Crashbox in einem RCAR Crashlastfall eingesetzt. Als Zielfunktion wird die Maximierung der Dehnungsenergie in einem späten Zeitpunkt der Simulation gewählt. Der Entwurfsraum wird mit Volumenelementen gefüllt. Es wird ein Volumenfüllungsanteil von 50 % vorgegeben. Obwohl ein optimierter Kraft-Weg-Verlauf erreicht werden kann, weist dieser Ansatz einige bedeutende Probleme auf, welche insbesondere aus dem angestrebten Füllgrad von 50 % und der groben Diskretisierung des Entwurfsraums mit Volumenelementen resultieren. Die aus diesem Ansatz resultierenden Wandstärken führen dazu, dass es sich bei der Crashbox nicht mehr um eine dünnwandige Struktur handelt. Zusammen mit der groben Diskretisierung können Eigenheiten von axial belasteten Profilstrukturen wie beispielsweise das Faltenbeulen nicht oder nur unzureichend abgebildet werden. Für ein (industriell) herstellbares Bauteil sind zudem weitere konstruktive Arbeitsschritte notwendig, was unter anderem ebenfalls an der groben Auflösung mit Volumenelementen liegt.

Kommerziell umgesetzt wurde die ESLM in der Software OptiStruct der Firma Altair und in GENESIS der Firma Vanderplaats R&D. Als Anwendungsspektrum werden bei GENESIS nichtlinear belastete Strukturen mit moderaten Deformationen genannt. Die Optimierung von Strukturen mit stark lokalem Beulverhalten, wie beispielsweise Faltenbeulen, wird explizit nicht zum Anwendungsbereich gezählt (Witowski et al. 2014).

2.4.3 Hybrid Cellular Automata

Beim *Hybrid Cellular Automata* Ansatz (Patel 2007; Patel et al. 2009) wird der Entwurfsraum mit Zellen, meist finiten Volumenelementen, gefüllt. Jede Zelle kann einen Status zwischen 0 (kein Material) und 1 (volles Material) annehmen. Die Veränderung jedes Elements hängt von seinen Nachbarelementen ab und wird über eine Heuristik gesteuert, welche den Ausgleich der inneren Energiedichte zum Ziel hat. Als Funktionsaufrufe können explizite FE-Simulationen verwendet werden. Im von Patel (2007) vorgestellten HCA-Ansatz können dünnwandige Strukturen, wie sie für Crashstrukturen üblich sind, aufgrund des Ansatzes mit Volumenelementen nicht effizient abgebildet werden. Zudem ist der Ausgleich der inneren Energiedichte als Zielfunktion problematisch für Strukturen, welche Energie absorbieren sollen, da viele effiziente Ansätze zur Energieabsorption auf einer ungleich verteilten Energiedichte beruhen (z.B. Faltenbeulen).

Aus diesem Grund wurde die Methode von Hunkeler (2014) und Zeng (2019) zur Anwendung auf dünnwandige Strukturen weiterentwickelt: *Hybrid Cellular Automata for Thin-Walled Structures* (HCA-TWS). Dabei wird die Idee der Verwendung einer Grundstruktur mit dem HCA-Ansatz kombiniert. Im Bauraum werden Wände aus mehreren Shell-Elementen anstelle einzelner Volumenelemente als Zellen verwendet. Das ermöglicht das Ausbilden von Fließgelenken und folglich inhomogenen Energiedichteverteilungen innerhalb einer Wand. Die Entwurfsvariablen in der HCA-TWS sind die Wanddicken der Zellen. Der Optimierungsprozess besteht aus einer äußeren und einer inneren Schleife (vgl. Abbildung 2–21).

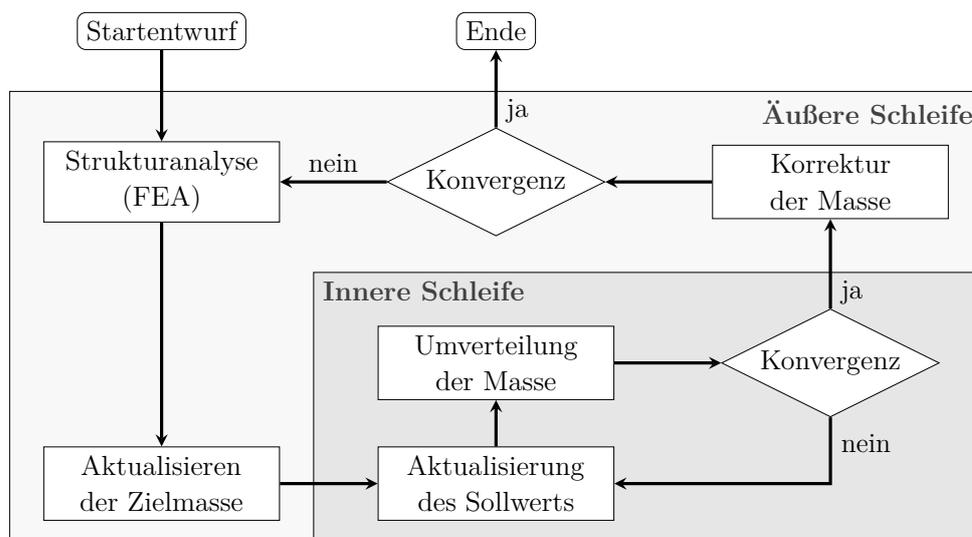


Abbildung 2–21: Ablauf der HCA-TWS (modifiziert aus (Zeng 2019))

Das Ziel der äußeren Schleife ist die Bestimmung einer Zielmasse auf Basis der globalen Strukturantworten und der vordefinierten Restriktionen. Dabei wird ein monotoner Zusammenhang zwischen der Masse der Struktur und ausgewählten Strukturantworten (z.B. Verschiebungen) angenommen. Für die Ermittlung der Zielmasse werden zunächst Finite Elemente Analysen (z.B. Crashsimulationen) durchgeführt und daraus die globalen und lokalen Strukturantworten extrahiert. Die globalen Strukturantworten werden für die Aktualisierung der Zielmasse der Struktur in der äußeren Schleife herangezogen. Aus der Verletzung einer Intrusionsrestriktion wird beispielsweise geschlossen, dass die Masse der Struktur erhöht werden muss, um die Intrusionswerte zu reduzieren.

In der inneren Schleife wird die Masse der einzelnen Zellen auf Basis der lokalen Feldwerte der Zielmasse und der Nachbarschaft der Zelle umverteilt. Hierfür werden „cellular automata“-Regeln verwendet. Diese Regeln werden dabei auf ganze Wände (Zellen), bestehend aus mehreren Shell-Elementen, anstelle von einzelnen Volumenelementen angewendet. Der Optimierungsansatz hat dabei die Homogenisierung von Feldgrößen zum Ziel (Zeng 2019). In der Regel werden dabei für linear-statische Optimierungen Spannungen und für Crashlastfälle innere Energiedichten herangezogen (Zeng 2019).

In (Hunkeler 2014; Duddeck et al. 2016; Zeng und Duddeck 2017; Zeng 2019) wird die Anwendung der HCATWS auf axiale Crashstrukturen untersucht (vgl. Abbildung 2–22 (a)). Das Problem wird aufgrund von Fertigungsrandbedingungen auf ein 2D-Querschnitt-Topologieoptimierungsproblem reduziert (vgl. Abbildung 2–22 (b)). Jede Wand bildet dabei eine eigene Zelle. Für den axialen Fallturmlastfall können in den Untersuchungen als Optimum Topologien gefunden werden, welche den aus (Kim 2002) bekannten Topologien ähneln (vgl. Abbildung 2–22 (c)). Zudem wird die Methode für Lastfälle mit schräg-axialer Belastung erfolgreich eingesetzt. Es ist festzustellen, dass das Ergebnis dabei stark von der anfänglichen Grundstruktur abhängt, welche in diesem Fall erst Kammern ermöglicht, die sich als optimal erwiesen haben. Eine alternativ gewählte Grundstruktur hätte möglicherweise zu einem grundlegend anderen Ergebnis führen können.

Die *Hybrid Cellular Automata* Methode wurde kommerziell in der Software LS-TaSC der Firma LSTC umgesetzt.

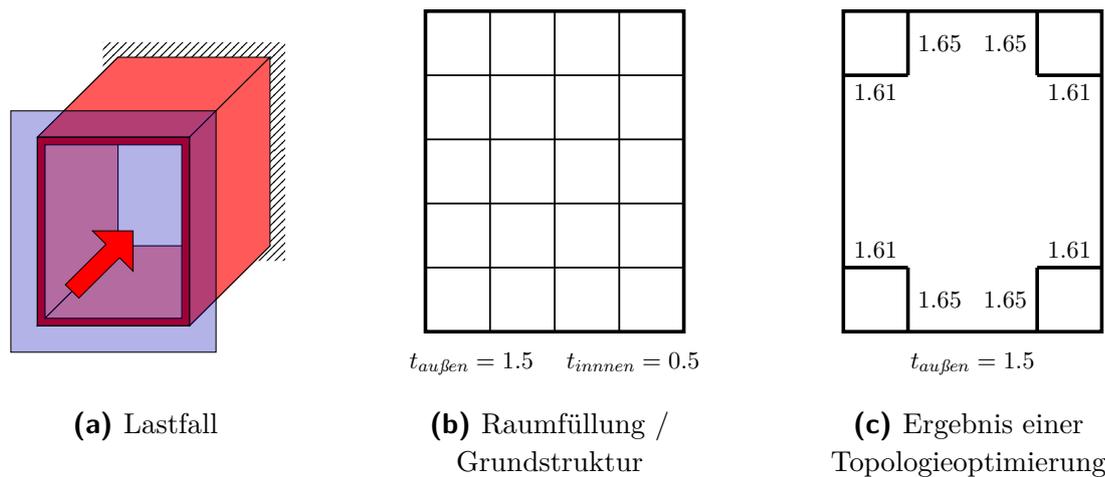


Abbildung 2-22: Anwendung der HCATWS auf eine axial belastete Profilstruktur (modifiziert aus (Duddeck et al. 2016), alle Maße in mm)

2.4.4 Evolutionary Level Set Method

Die *Evolutionary Level Set Method* (Bujny et al. 2017) ist eine Kombination von evolutionären Optimierungsalgorithmen und Level-Set-Methoden (LSM). Im Gegensatz zu vielen dichtebasierten Ansätzen wird der Entwurfsraum bei den Level-Set-Methoden nicht explizit über die Dichte einzelner Elemente, sondern implizit über die Ränder zwischen Bereichen mit und ohne Material parametrisiert (vgl. Abbildung 2-23 (a)). Folglich sind die Materialgrenzen klar definiert, was hilfreich für die Fertigbarkeit ist und zudem zu weniger numerischen Problemen bei den nichtlinearen Crashsimulationen führt (Bujny et al. 2017). Durch die Verwendung von geometrischen Funktionen (sog. Level-Set-Funktionen, vgl. Abbildung 2-23 (b)) bzw. der Kombination mehrerer Level-Set-Funktionen (vgl. Abbildung 2-23 (c)) kann die Anzahl an Entwurfsvariablen stark reduziert werden. Bereiche, in welchen diese Funktionen Werte größer null annehmen, verfügen über Material. Der Rand der Struktur ist durch Funktionswerte gleich null definiert.

Die vergleichsweise geringe Anzahl an Entwurfsvariablen ermöglicht die Verwendung von stochastischen Optimierungsmethoden. Nach Bujny et al. (2017) hat das für die Optimierung von Crashstrukturen zum einen den Vorteil, dass keine Sensitivitäten benötigt werden, welche nur unter großem Ressourcenaufwand zu erlangen wären. Zum anderen ermöglichen stochastische Optimierungsalgorithmen eine globale Abtastung des Entwurfsraums, was bei der Crashsimulation aufgrund von nichtlinearen Zusammenhängen zwischen Entwurfsvariablen und Strukturantworten von Vorteil ist. Bei der Topologieoptimierung von zweidimensionalen Crashstrukturen liefert der Ansatz nachvollziehbare Ergebnisse (vgl.

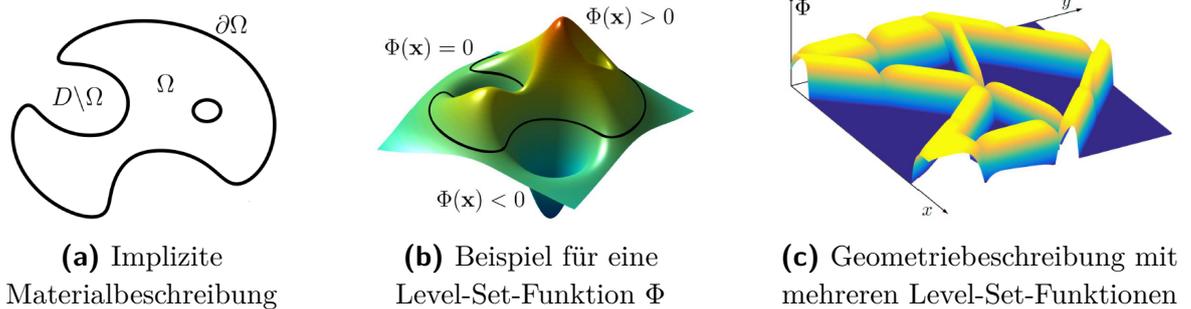


Abbildung 2–23: Beschreibung der Topologie in der EA-LSM (aus (Bujny et al. 2017))

(Bujny et al. 2017)). Jedoch ist bisher keine Anwendung der Methode auf dreidimensionale Crashstrukturen oder eine kommerzielle Umsetzung der Methode bekannt.

2.4.5 Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung

Die *Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung* (Olschinka und Schumacher 2008; Ortmann und Schumacher 2013; Ortmann 2015; Ortmann et al. 2021) wurde als Methode zur gleichzeitigen Topologie- und Formoptimierung sowie Dimensionierung von Profilstrukturen unter Crashbelastung entwickelt. In diesem Abschnitt wird eine kurze Einführung in die Methode gegeben, entsprechende Veröffentlichungen aufgezeigt sowie die Vor- und Nachteile im Hinblick auf die vorgestellten Methoden diskutiert. Eine detaillierte Beschreibung dieser Methode, welche den Ausgangspunkt für diese Arbeit bildet, ist in Kapitel 3 zu finden.

Durch die Beschreibung der zu optimierenden Struktur mittels mathematischer Graphen wird das eigentliche Optimierungsproblem auf die Optimierung einer zweidimensionalen Profilquerschnittstopologie reduziert. Diese Graphenbeschreibung ermöglicht eine effiziente Modifikation der Geometrie bzw. Topologie sowie die Überprüfung von Fertigungsrestriktionen während der Optimierung. Aus der Graphenbeschreibung des Profilquerschnitts wird ein dreidimensionales FE-Modell abgeleitet, welches anschließend zur Evaluation der Entwürfe in einem oder mehreren Crashlastfällen berechnet wird.

Eine weitere wichtige Charakteristik der Methode ist die Verwendung von aus Expertenwissen abgeleiteten Heuristiken zur Topologiemodifikation. Die Heuristiken werden dabei nicht sequenziell angewendet. Stattdessen konkurrieren die Heuristiken in jeder Iteration miteinander. Zudem wird eine bestimmte Anzahl der besten Entwürfe einer Iteration als Grundlage für die nächste Iteration genutzt.

Das ermöglicht eine bessere Abtastung des Entwurfsraums als die Weiterverfolgung eines einzigen Entwurfs.

Der Optimierungsprozess der GHT ist aufgeteilt in eine äußere und eine innere Optimierungsschleife. In der äußeren Optimierungsschleife werden die Heuristiken zur Topologiemodifikation aktiv. In der inneren Optimierungsschleife findet hingegen eine Formoptimierung und Dimensionierung mittels mathematischer Optimierungsverfahren statt. Hierfür können die Positionen der Wände sowie die Wandstärken als Entwurfsvariablen verwendet werden. Alternativ zu einer kompletten inneren Optimierungsschleife kann diese in reduzierter Form zur Dimensionierung oder mit einem einzelnen Funktionsaufruf zur Evaluierung eines neuen Entwurfs erfolgen. Ein Vorteil der Methode ist die Möglichkeit zur Verwendung von Crashkenngrößen (wie z.B. Intrusionen, Beschleunigungen, Verletzungsschwerekennzahlen, etc.) als Ziel- und Restriktionsfunktionen.

Die *Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung* hat sich im industriellen Umfeld erfolgreich als effiziente Methode zur Craschoptimierung von Strangpressprofilen bewährt. Bedeutsam hierfür ist neben der reinen Fähigkeit zur Verbesserung der Struktureigenschaften eine vertretbare Anzahl an Funktionsaufrufen bei der Evaluierung der Entwürfe, da die verwendeten Gesamtfahrzeug-Crashmodelle andernfalls zu einem nicht beherrschbaren Ressourcenbedarf führen. Als nachteilig ist zu bewerten, dass die Methode in ihrer bisherigen Form auf die Optimierung von Profilstrukturen mit einem konstanten Querschnitt begrenzt ist.

Die Weiterentwicklung der GHT ist Ziel zahlreicher Forschungsaktivitäten. Neben den beschriebenen Ansätzen, welche hauptsächlich lateral crashbelastete Strangpressstrukturen im Fokus haben, liegt der Fokus dabei auf anderen Fertigungsmethoden und Werkstoffen, wie beispielsweise Strukturen aus Verbundwerkstoffen (Schneider et al. 2018) und Profilstrukturen in Schalenbauweise (Link et al. 2019). In Sperber et al. (2019), Sperber et al. (2021) sowie der vorliegenden Arbeit wird der Ansatz auf hauptsächlich axial belaste Crashstrukturen erweitert. Neben der Topologieoptimierung von Profilstrukturen wird zudem die Erweiterung des Ansatzes auf Rippenstrukturen (Schneider und Schumacher 2018) und dreidimensionale Rahmenstrukturen unter Crashbelastung (Beyer et al. 2021) untersucht.

3 Methode der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung

In diesem Kapitel wird die Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung als Grundlage für die in dieser Arbeit entwickelten Algorithmen und Methoden beschrieben. Die Schwerpunkte bilden dabei die graphenbasierte Beschreibung des Profilquerschnitts, die automatisierte FE-Modellerzeugung, die Heuristiken zur Strukturoptimierung sowie der Optimierungsablauf. Weiterhin wird auf die Umsetzung der Softwarelösung eingegangen. Die Ausführungen in diesem Kapitel basieren auf den Arbeiten von Ortmann und Schumacher (2013), Ortmann (2015) und Ortmann et al. (2021).

3.1 Graphenbasierte Geometriebeschreibung und FE-Modellerzeugung

Eine wesentliche Komponente der GHT ist die Beschreibung der zu optimierenden Querschnittsgeometrien mittels mathematischer Graphen. Im Vergleich zu Modifikationen am FE-Netz oder parametrisierten CAD-Modellen (Computer Aided Design) ermöglicht diese Geometriebeschreibung vergleichsweise einfache Topologiemodifikationen während der Optimierung, wie z.B. das Hinzufügen oder Löschen von Wänden. Neben Strangpress- bzw. Extrusionsprofilen, welche im Fokus dieser Arbeit stehen und daher Gegenstand der folgenden Beschreibungen sind, können ebenfalls Profilstrukturen, welche mit anderen Fertigungsverfahren hergestellt werden, beschrieben werden (vgl. Abschnitt 2.4.5). Die Methode ist auf die Beschreibung von Profilgeometrien mit konstantem Querschnitt in Extrusionsrichtung ausgelegt.

Der Graph wird mittels einer für die GHT entwickelten Graphensyntax in einer ASCII-Datei (American Standard Code for Information Interchange) gespeichert (vgl. Abbildung 3–1). Zur Beschreibung der zweidimensionalen Querschnittsgeometrie ist der Graph einfach, planar und gerichtet. Die Verwendung gerichteter Kanten ermöglicht unter anderem die Beschreibung gekrümmter Wände mit nur einem zusätzlichen Parameter sowie die Verknüpfung der Graphen mit den daraus abgeleiteten FE-Netzen und den FE-Ergebnisdaten.

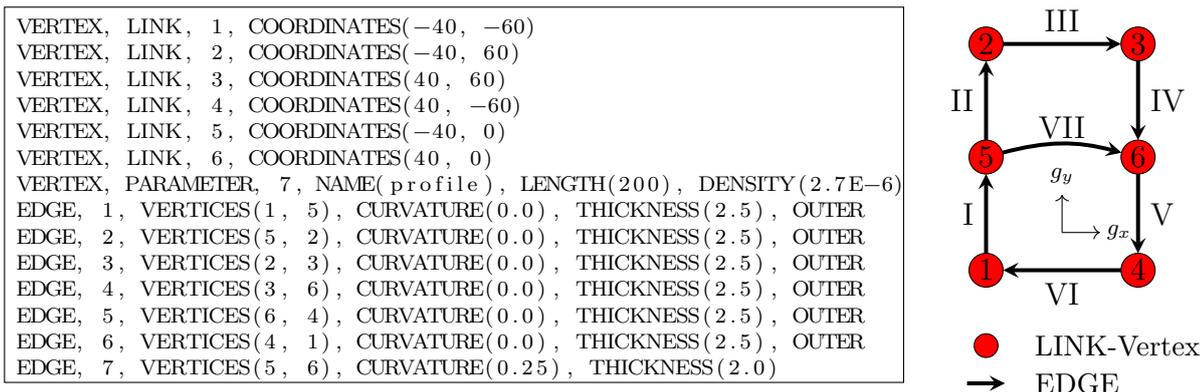


Abbildung 3–1: Graphensyntax und 2D-Graphen-Repräsentation (mit Graphenkoordinatensystem g_{xy})

Jede Wand in der zu optimierenden Geometrie wird durch eine Kante im Graphen dargestellt. Eine Wand wird dabei immer zwischen zwei LINK-Knoten definiert. Zudem gibt es einen PARAMETER-Knoten. Im Folgenden werden die Elemente detaillierter erläutert:

- **LINK-Knoten** (LINK-Vertex):
Dieser Knoten enthält die kartesischen Koordinaten der Start- und Endpunkte von Kanten im Profilquerschnitt. Er wird durch rote Punkte im Graphen repräsentiert.
- **PARAMETER-Knoten** (PARAMETER-Vertex):
Dieser Knoten enthält grundlegende Informationen zur Profilstruktur, wie die Länge in Extrusionsrichtung und die Dichte des Materials, welche für eine graphenbasierte Gewichtsrechnung benötigt werden. Er darf nur ein einziges Mal im Graphen existieren. In den Graphenvisualisierungen dieser Arbeit wird der Knoten nicht dargestellt.
- **Kante** (EDGE):
Jede Wand im Profilquerschnitt wird durch eine Kante (schwarzer Pfeil in der Graphendarstellung) beschrieben. Kanten enthalten Informationen zu

den Start- und Endknoten, der Wanddicke, der Krümmung und ob es sich bei der Wand um eine innere oder äußere Wand der Struktur handelt. Äußere Wände können während der Optimierung aufgeteilt und ihre Wanddicke skaliert, jedoch nicht gelöscht oder verschoben werden. Wird die Wanddicke einer äußeren Wand auf 0 gesetzt, dient diese zur Beschreibung des Entwurfs- bzw. Bauraums und repräsentiert nicht eine physische Wand.

Die Ableitung des dreidimensionalen FE-Modells aus dem Graphen erfolgt in der GHT mittels der Software GRAMB (GRAPh based Mechanics Builder) (vgl. Abbildung 3–2). Neben dem in einer ASCII-Datei gespeicherten Graphen mit der Querschnittsbeschreibung werden hierfür weitere Informationen benötigt, die in einer Konfigurationsdatei (GRAMB_config) bereitgestellt werden. Die Extrusion des durch den Graphen beschriebenen Querschnitts erfolgt entlang vorgegebener Spline-Punkte im dreidimensionalen Raum. Für die Vernetzung stehen ein integriertes FE-Vernetzungsprogramm (SpEx - vgl. Bachelorarbeit von Leon Winnie Teichmann (Anhang A)) und Schnittstellen zur kommerziellen CAE-Software (Computer Aided Engineering) HyperMesh (Altair 2019) zur Verfügung. Um eine Zuordnung der Simulationsergebnisse zu einzelnen Graphen-Elementen zu ermöglichen, wird jeder Wand eine eigene FE-Bauteilnummer zugewiesen. Um eine Einbindung des Profils in komplexe FE-Modelle zu ermöglichen, werden zudem alle Wände in einer FE-Bauteilgruppe zusammengefasst und FE-Knoten-Gruppen erzeugt. Bei jedem Aufruf von GRAMB wird das gesamte FE-Modell der Profilstruktur neu erzeugt.

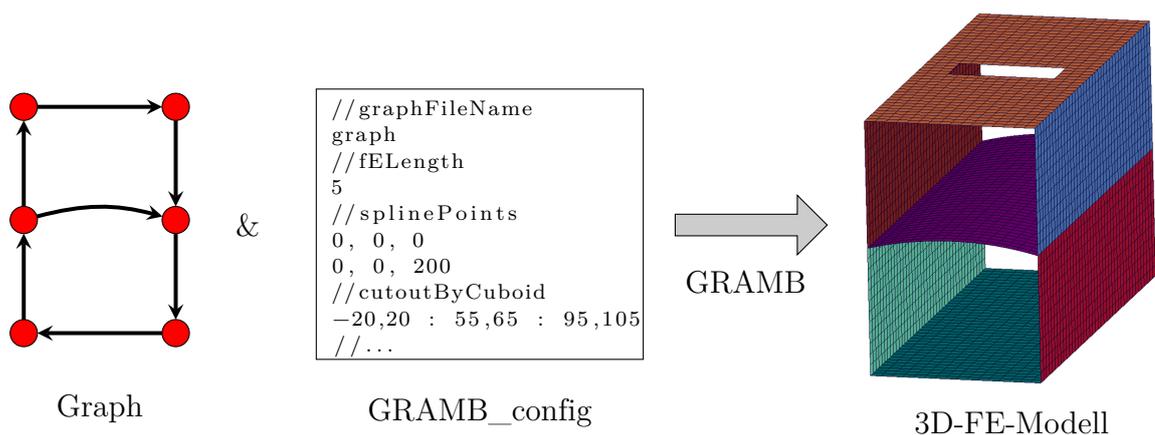


Abbildung 3–2: Automatisierte FE-Modellerzeugung mit GRAMB

In der vorliegenden Arbeit wird ausschließlich das in GRAMB implementierte FE-Vernetzungsprogramm (SpEx - vgl. Bachelorarbeit von Leon Winnie Teichmann (Anhang A)) genutzt, welches im Folgenden beschrieben wird. Abbildung 3–3

zeigt schematisch einen einfachen Vernetzungsprozess. Die Software ermöglicht das Extrudieren einer durch einen Graphen beschriebenen Querschnittsstruktur entlang eines dreidimensionalen Splines. Üblicherweise werden die Strukturen jedoch, wie dargestellt, entlang einer Strecke extrudiert oder verfügen über eine moderate Krümmung. Zunächst werden dafür Behelfspunkte auf dem Spline (bzw. der Strecke) im Abstand der FE-Zielkantenlänge bestimmt. Anschließend werden in der ersten Querschnittsebene FE-Knoten auf den durch die Graphen-Kanten beschriebenen Wänden erzeugt. Hierbei sollen die FE-Knoten ebenfalls einen Abstand nahe der FE-Zielkantenlänge haben. Die FE-Knoten in der Ebene werden im Anschluss an die Positionen der anderen Punkte auf dem Spline kopiert. Im letzten Schritt erfolgt die Vernetzung der FE-Knoten der verschiedenen Ebenen mit Schalenelementen.

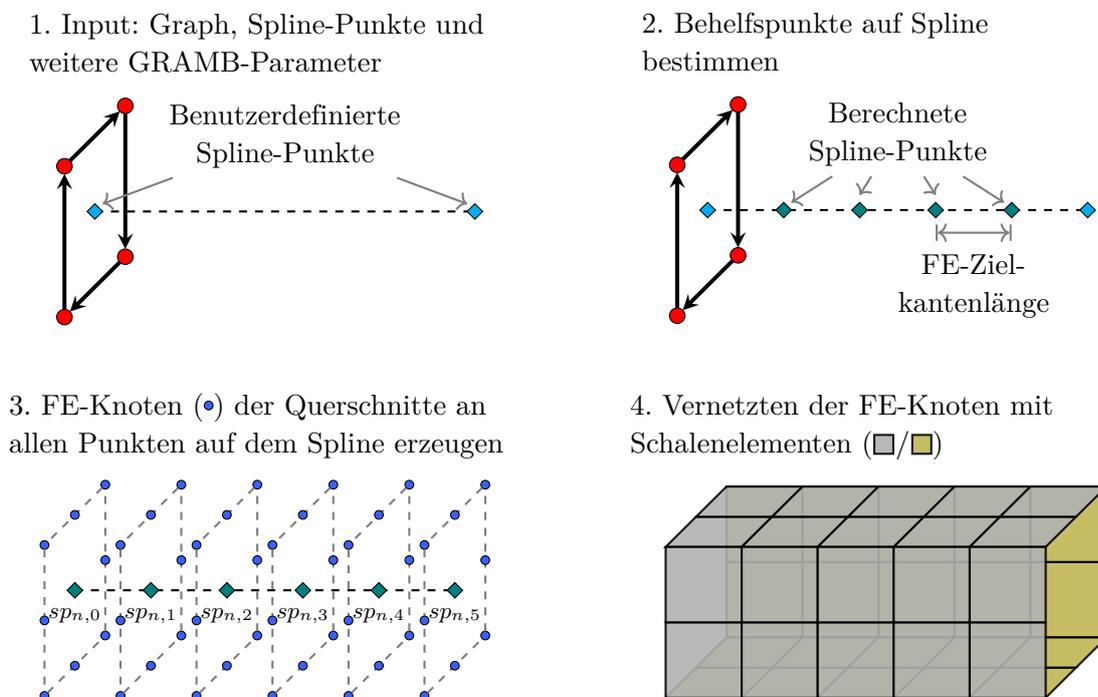


Abbildung 3–3: Schematischer Ablauf einer Vernetzung mit dem implementierten FE-Vernetzungsprogramm SpEx (in Anlehnung an Bachelorarbeit von Leon Winnie Teichmann und Masterarbeit von Enrique Benavides Banda (vgl. Anhang A))

Um die Integration des FE-Modells in einen vorgegebenen Lastfall zu ermöglichen, können durch GRAMB weitere Prozessschritte wie das Erstellen von FE-Gruppen, das Zuordnen von FE-Entitäts-ID-Bereichen (z.B. Zahlenbereiche für die FE-Knotennummern), FE-Materialkarten oder FE-Netzmodifikationen gesteuert werden. Zudem ermöglicht GRAMB das Erzwingen von Symmetrierestriktionen.

Die FE-Daten können dabei für verschiedene FE-Solver (z.B. PAMCRASH (ESI 2018) und LS-DYNA (LSTC 2016)) bereitgestellt werden.

GRAMB ermöglicht zudem die effiziente Überprüfung von Fertigungsrestriktionen durch graphenbasierte Algorithmen. Dadurch kann im Optimierungsprozess zu jeder Zeit sichergestellt werden, dass sich die vorgeschlagenen Entwürfe mittels Strangpressen herstellen lassen. Die Algorithmen zum Überprüfen der Fertigungsrestriktionen sind detailliert in (Ortmann 2015) beschrieben. Die Überprüfung der folgenden Fertigungsrestriktionen ist mit GRAMB möglich:

- Minimale und maximale Wanddicke
- Minimaler Verbindungswinkel zwischen Wänden
- Minimaler Abstand zwischen Wänden
- Maximale Anzahl an Kammern im Profilquerschnitt

3.2 Heuristiken zur Optimierung von Crashstrukturen

Wie in Abschnitt 2.3.4 erläutert, ist die Topologieoptimierung von Crashstrukturen aktuell ein Bereich der Optimierung, in dem gradientenbasierte Methoden nicht angewendet werden können oder ihre Anwendung ineffizient (z.B. hinsichtlich der benötigten Anzahl an Funktionsaufrufen) ist. Stattdessen können Heuristiken zur Optimierung eingesetzt werden. Ihr Ziel ist es mit begrenztem Wissen das Optimum zu finden oder zumindest eine Verbesserung der Struktur hinsichtlich der Zielfunktion zu erreichen (Ortmann 2015). In der GHT werden eine Vielzahl unterschiedlicher Heuristiken eingesetzt, welche Gegenstand dieses Abschnitts sind. Die Ableitung der Heuristiken für die GHT erfolgt aus Expertenwissen, welches im Rahmen von Expertenbefragungen (z.B. von Berechnungsingenieuren im Bereich der passiven Fahrzeugsicherheit) ermittelt wurde.

Die Heuristiken in der GHT führen dabei Veränderungen nicht direkt am FE-Netz durch. Stattdessen werden Modifikationen am Graphen durchgeführt. In der GHT wird zwischen Heuristiken zur Topologiemodifikation und Heuristiken zur Formoptimierung und Dimensionierung unterschieden.

Heuristiken zur Topologieänderung analysieren FE-Ergebnisse (innere Energiedichten, Verschiebungs-, Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsvektoren) oder den Graphen und schlagen basierend darauf Topologiemodifikationen vor. Ihre

Anwendung führt zu einer Änderung der Topologiekategorie des Graphen. Verfügt das Optimierungsproblem über mehrere Lastfälle, werden die FE-Ergebnisse aller Lastfälle, es sei denn, sie werden explizit ausgeschlossen, in der Analyse der Heuristiken berücksichtigt. Im Gegensatz dazu analysieren Heuristiken zur Formänderung und Dimensionierung ausschließlich den Graphen. Basierend darauf schlagen sie Änderungen der Form (z.B. das Zusammenführen von zwei Kanten, welche unter einem stumpfen Winkel aufeinandertreffen) oder der Wanddicken vor.

Nach allen Änderungen der Heuristiken am Graphen werden die Fertigungsrestriktionen (vgl. Abschnitt 3.1) überprüft. Ist ein Entwurf der Heuristiken zur Topologieänderung nicht fertigbar, schlägt die jeweilige Heuristik in der Regel alternative Entwürfe vor.

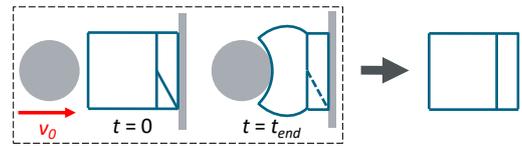
Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den verwendeten Heuristiken und der Verbesserung der Zielfunktion lässt sich nur für spezielle Fälle aufzeigen. Eine Verbesserung der Zielfunktion durch alle jeweils angewendeten Heuristiken in jeder Iteration ist keinesfalls garantiert. Aus diesem Grund werden in der GHT verschiedene Heuristiken mit unterschiedlichen mechanischen Wirkprinzipien aktiv. Um eine Verbesserung der Struktur zu erreichen, muss folglich nicht jede Heuristik zu einer Verbesserung der Zielfunktion führen. Durch die unterschiedlichen mechanischen Wirkprinzipien der Heuristiken können zudem Verbesserungen für verschiedenste Zielfunktionen erreicht werden. Dennoch ist es aufgrund der Nichtlinearitäten und der Komplexität des Optimierungsproblems unwahrscheinlich, dass mit der GHT das globale Optimum für eine Crashstruktur gefunden wird.

3.2.1 Heuristiken zur Topologieänderung

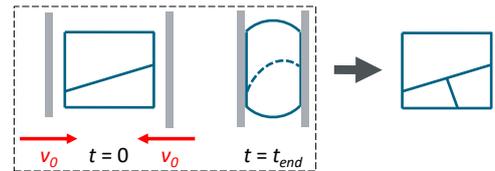
Heuristiken zur Topologieänderung führen immer zu einer Änderung der Topologiekategorie des Graphen. Die verschiedenen zugrunde liegenden mechanischen Wirkprinzipien können dabei teilweise gegensätzlich sein. In der GHT werden acht Heuristiken zur Topologieänderung aktiv, welche in den Abbildungen 3–4 und 3–5 zusammengefasst werden. Eine detaillierte Beschreibung der zugrunde liegenden Algorithmen kann (Ortmann 2015) und (Ortmann et al. 2021) entnommen werden.

Delete Needless Wall (DNW)

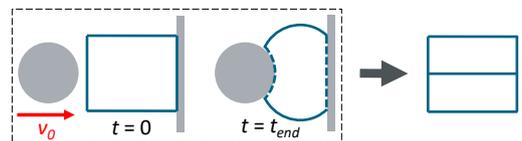
Ziel dieser Heuristik ist das Entfernen unbelasteter und somit nicht benötigter Wände. Als Indikator für eine nicht benötigte Wand wird eine vergleichsweise geringe innere Energiedichte herangezogen.

**Support Buckling Walls (SBW)**

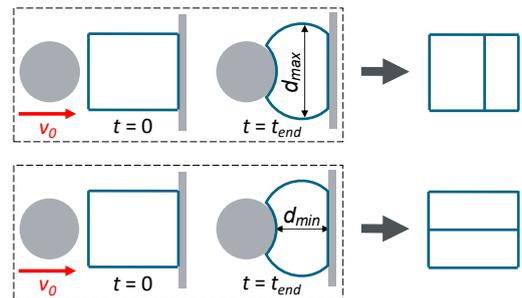
Ziel dieser Heuristik ist es, sich schnell bzw. unkontrolliert deformierende Wände (z.B. durch Beulen-, Falt- oder Knickphänomene) abzustützen und somit die strukturelle Integrität des Profils zu verbessern. Zur Identifikation dieser Wände berechnet die Heuristik einen Beulindex auf Basis von Geschwindigkeitsdifferenzen der FE-Knoten dieser Wand.

**Balance Energy Density (BED)**

Diese Heuristik versucht Wände mit hoher und niedriger innerer Energiedichte zu verbinden und diese somit im Bauteil zu homogenisieren. Ziel ist eine gleichmäßige Beanspruchung der Struktur.

**Use Deformation Space (UDS)**

Energie kann durch plastische Deformation absorbiert werden. Diese Heuristiken versuchen daher Wände, welche sich aufeinander zu- (UDS Compression) oder voneinander wegbewegen (UDS Tension), zu verbinden und somit diesen Deformationsraum zur Energiedissipation durch die neue Wand zu nutzen.

**Remove Small Chambers (RSC)**

Ziel dieser Heuristik ist das Entfernen kleiner Kammern aus dem Querschnitt. Dieser Heuristik liegt die Annahme zugrunde, dass das Entfernen kleiner Kammern bei lateral belasteten Crashstrukturen nur vergleichsweise geringe Auswirkungen auf das Strukturverhalten hat.

**Support Collapsing Walls (SCW)**

Diese Heuristik sucht nach den Wänden mit Materialversagen, welche in der Crashsimulation üblicherweise durch das Löschen von Finiten Elementen abgebildet werden und versucht diese abzustützen. Ziel ist der Erhalt der strukturellen Integrität.

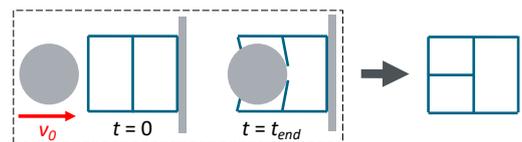
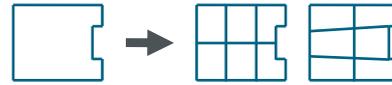


Abbildung 3–4: Heuristiken zur Topologieoptimierung
(Teil 1, Abbildungen aus (Ortmann et al. 2021))

Create Lattice Structures (CLS)

Die meisten der bisher vorgestellten Heuristiken erzeugen tendenziell eher unregelmäßige Strukturen. Im Gegensatz dazu erstellt diese Heuristik regelmäßige Gitterstrukturen. Die Gitterstrukturen basieren dabei immer auf dem Startentwurf.



Use Center of Gravity (UCG)

Diese Heuristik versucht zwei existierende Wände durch eine neue Wand zu verbinden, sodass die neue Wand nahe dem Schwerpunkt des Profils verläuft. Ziel der Heuristik ist es einen Lastpfad durch den Schwerpunkt (COG - Center of Gravity) aufzubauen und somit einer Rotation der Struktur um die Extrusionsrichtung durch ungleiche Kraftpfade entgegenzuwirken.



Abbildung 3–5: Heuristiken zur Topologieoptimierung
(Teil 2, Abbildung der Heuristik CLS aus (Ortmann et al. 2021))

3.2.2 Heuristiken zur Formänderung und Dimensionierung

Smooth Structure

Ziel dieser Heuristik ist das Glätten bzw. Vereinfachen der Querschnittsgeometrie. Hierfür werden Wände, welche unter einem stumpfen Winkel verbunden sind und bei welchen an ihrem Verbindungspunkt keine weitere Wand angreift, zu einer Wand zusammengefasst.



Scale Wall Thicknesses

Das Hinzufügen und Entfernen von Wänden im Querschnitt kann einen großen Einfluss auf Masse der Struktur sowie weiterer Eigenschaften wie der Steifigkeit haben. Um einen negativen Einfluss der Massenänderung auf den Optimierungsablauf zumindest teilweise zu kompensieren, skaliert diese Heuristik alle Wandstärken, sodass die Masse der Struktur trotz der Topologiemodifikation konstant bleibt.



Abbildung 3–6: Heuristiken zur Formänderung und Dimensionierung
(Abbildungen aus (Ortmann et al. 2021))

Die Heuristiken zur Formänderung und Dimensionierung analysieren ausschließlich den Graphen und schlagen basierend darauf Änderungen der Form (z.B. eine

Vereinfachung der Querschnittsgeometrie) oder der Wanddicken vor. Diese Heuristiken konkurrieren nicht mit den Heuristiken zur Topologieänderung und werden nach einer Topologieänderung auf jeden Entwurf der GHT angewendet. In der GHT sind zwei dieser Heuristiken aktiv. Ihre Funktionsweise ist in Abbildung 3–6 erläutert.

3.3 Optimierungsablauf

In der GHT wird das Optimierungsproblem der kombinierten Topologieoptimierung, Formoptimierung und Dimensionierung auf zwei ineinander verschachtelte Optimierungsschleifen aufgeteilt. In der äußeren Optimierungsschleife werden die vorgestellten Heuristiken aktiv und folglich die Topologieänderungen durchgeführt. In der inneren Optimierungsschleife hingegen, welche immer auf einem Entwurf der äußeren Schleife beruht, kann eine Dimensionierung oder eine gekoppelte Dimensionierung und Formoptimierung durchgeführt werden. Alternativ ist ein einzelner Funktionsaufruf zur Evaluierung des Entwurfs aus der äußeren Optimierungsschleife möglich. In der inneren Optimierungsschleife kommen konventionelle Optimierungsalgorithmen (wie beispielsweise SRSM (Stander und Craig 2002)) zur Anwendung. Abbildung 3–7 zeigt exemplarisch einen Entwurfsbaum der GHT mit den Entwürfen der äußeren Optimierungsschleife. Die Optimierungsmöglichkeiten der inneren Optimierungsschleife sind durch Piktogramme angedeutet. Die beiden Optimierungsschleifen werden im Folgenden genauer beschrieben.

3.3.1 Äußere Optimierungsschleife

Das Ablaufdiagramm der äußeren Optimierungsschleife ist in Abbildung 3–8 dargestellt. Die äußere Optimierungsschleife startet in der ersten Iteration mit dem sogenannten Startentwurf, welcher mittels eines einzelnen Funktionsaufrufs oder einer Formoptimierung und/oder Dimensionierung evaluiert wird. Üblicherweise handelt es sich hierbei um einen Entwurf, der ausschließlich aus Außenwänden besteht, welche den zur Verfügung stehenden Entwurfsraum begrenzen. Alternativ ist es jedoch möglich mit zusätzlichen inneren Wänden zu starten oder eine optimierte Außengeometrie mit einer initialen Formoptimierung zu finden.

In der äußeren Optimierungsschleife werden die Heuristiken aktiv. Basierend auf den Graphen und den FE-Ergebnisdaten der besten konkurrierenden Entwürfe der vorangegangenen Iteration (Anzahl N_{cd} ; Index des aktuellen konkurrierenden

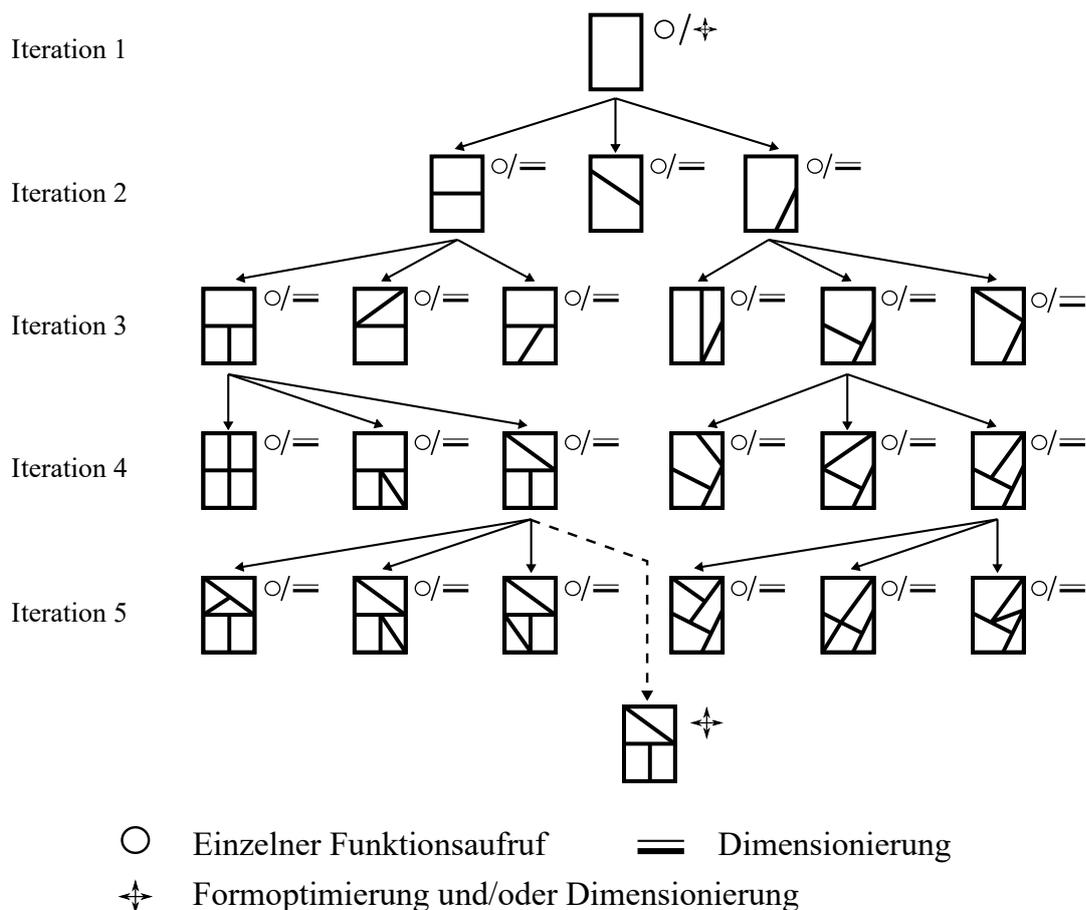


Abbildung 3–7: Exemplarischer Entwurfsbaum der GHT mit drei aktiven Heuristiken zur Topologieänderung und der Weiterverfolgung von zwei konkurrierenden Entwürfen pro Iteration der äußeren Optimierungsschleife (modifiziert aus (Ortmann et al. 2021))

Entwurfs n_{ed}) schlagen die Heuristiken zur Topologieänderung (Anzahl N_h ; Index der aktiven Heuristik n_h) neue Topologien vor. Auf diesen werden dann jeweils wieder alle Heuristiken zur Formänderung und Dimensionierung aktiv. Für jeden dieser Entwürfe wird anschließend eine innere Optimierungsschleife zur Evaluation durchgeführt. Dies kann, abhängig vom Optimierungsproblem, einen oder mehrere Funktionsaufrufe beinhalten.

Um die Abtastung des Entwurfsraums zu verbessern und folglich bessere Ergebnisse zu finden, werden in der äußeren Optimierungsschleife eine definierte Anzahl der besten Entwürfe der vorangegangenen Iteration weiterverfolgt und als Ausgangsentwürfe (Eltern-Entwürfe) für die nächste Iteration verwendet. Der Standardwert für die Anzahl dieser konkurrierenden Entwürfe liegt bei fünf. Auf jedem dieser Elternentwürfe werden alle Heuristiken zur Topologieänderung unabhängig voneinander aktiv und schlagen neue Entwürfe (Kind-Entwürfe) vor. Für

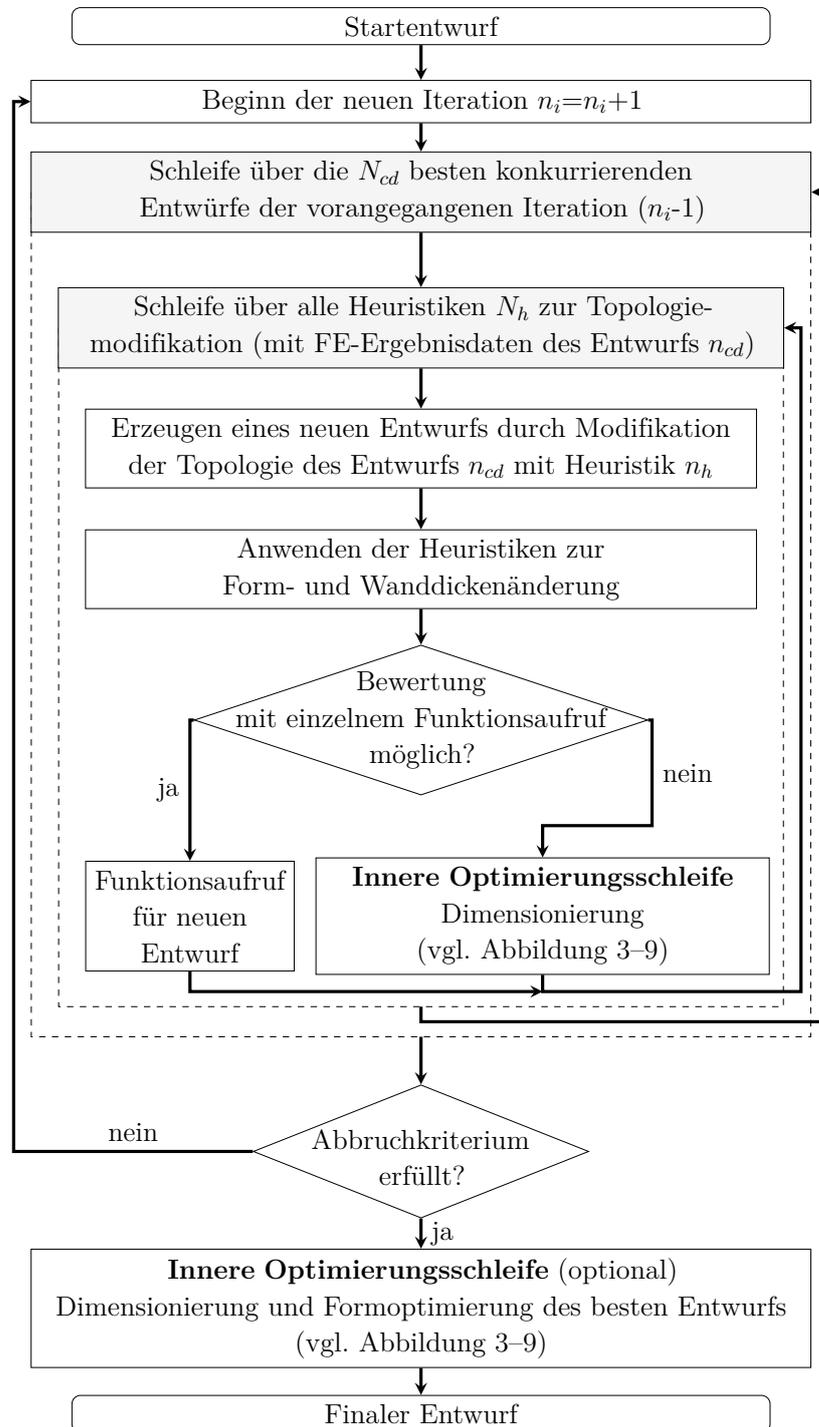


Abbildung 3–8: Ablaufdiagramm der äußeren Optimierungsschleife (modifiziert aus (Ortmann et al. 2021))

ihre Analysen haben die Heuristiken zur Topologieänderung Zugriff auf die FE-Ergebnisdaten des besten Entwurfs der inneren Optimierungsschleife der jeweiligen Eltern-Entwürfe.

Eine Ausnahme von den Heuristiken, welche sukzessive Topologieänderungen auf Basis der vorangegangenen Iteration durchführen, stellt die Heuristik *Create Lattice Structures* dar. Diese Heuristik wird immer auf dem Startentwurf aktiv, orientiert sich mit ihren Entwürfen jedoch an der Topologiekategorie und der Masse der anderen Entwürfe der jeweiligen Iteration.

Das Abbruchkriterium der äußeren Optimierungsschleife ist eine zuvor definierte Anzahl an Iterationen oder das Erreichen einer bestimmten Anzahl an Iterationen ohne eine Verbesserung. Eine Iteration wird als Iteration ohne Verbesserung gewertet, wenn entweder keine Verbesserung der Restriktionsverletzungen erfolgt oder wenn bei gleichbleibender Restriktionsverletzung keine Verbesserung der Zielfunktion stattfindet. Für den bis dahin besten Entwurf kann anschließend eine umfangreiche Formoptimierung und/oder Dimensionierung durchgeführt werden.

3.3.2 Innere Optimierungsschleife

Der Ablauf der inneren Optimierungsschleife ist in Abbildung 3–9 dargestellt. Die innere Optimierungsschleife wird durch die äußere Optimierungsschleife gesteuert und kann an mehreren Stellen der äußeren Optimierungsschleife initiiert werden. Die Funktionsaufrufe zur Evaluierung der Zielfunktion sowie der Restriktionen werden ausschließlich in der inneren Optimierungsschleife durchgeführt. Unter einem Funktionsaufruf wird in der GHT in der Regel die Bewertung der Zielfunktion und der Restriktionen in allen Lastfällen mit jeweils einer Crashsimulation verstanden.

Für den Startentwurf und den finalen Entwurf der GHT können jeweils umfangreiche Formoptimierungen und Dimensionierungen mit vielen Entwurfsvariablen durchgeführt werden. Demgegenüber stehen die inneren Optimierungsschleifen zur Evaluation neuer Entwürfe der Heuristiken der äußeren Optimierungsschleife. Sind an dieser Stelle keine Entwurfsvariablen vorhanden, da beispielsweise die Masse der Struktur in der Optimierungsaufgabe festgeschrieben ist, so wird der neue Entwurf mit einem Funktionsaufruf evaluiert. Ist für die Bewertung jedoch mehr als ein Funktionsaufruf notwendig, wird eine reduzierte innere Optimierungsschleife mit einer geringen Anzahl an Entwurfsvariablen zur Dimensionierung durchgeführt. Ziel dieser reduzierten inneren Optimierungsschleife ist eine effiziente

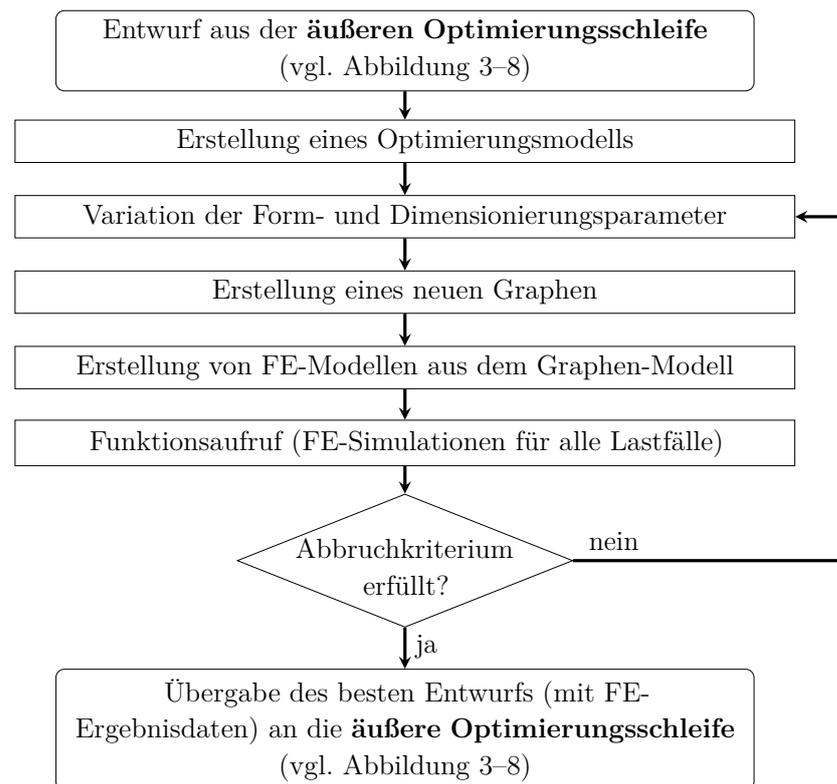


Abbildung 3–9: Ablaufdiagramm der inneren Optimierungsschleife (modifiziert aus (Ortmann et al. 2021))

Bewertung aller Entwürfe. Sie stellt einen Kompromiss aus einer verbesserten Entwurfsraumabdeckung in der äußeren Optimierungsschleife durch die Verfolgung konkurrierender Entwürfe und einer vertretbaren Gesamtanzahl an Funktionsaufrufen im Optimierungsablauf dar.

In der inneren Optimierungsschleife werden konventionelle Optimierungsalgorithmen eingesetzt. Für die Evaluierung neuer Entwürfe der Heuristiken wird SRSM mit linearen Polynomen angewendet. Bei der umfangreicheren Formoptimierung und Dimensionierung des Startentwurfs sowie des finalen Entwurfs kommt SRSM mit radialen Basisfunktionen zum Einsatz. Die Parameter für die Entwurfsvariablen sowie deren Grenzen werden automatisiert auf Basis des gewählten Optimierungsansatzes ermittelt. Der Anwender hat dabei beispielsweise die Wahl, ob jeder Wand eine eigene Entwurfsvariable für die Wanddicke zugewiesen werden soll oder ob vereinfachte und damit in der Regel effizientere Ansätze verwendet werden sollen. So ist beispielsweise die Wahl einer einheitlichen Wanddicke für alle Wände (eine Entwurfsvariable) oder unterschiedliche Wanddicken für die inneren und äußeren Wände (zwei Entwurfsvariablen) möglich. Für die Grenzen der Wanddicken werden üblicherweise die Werte der Fertigungsrestriktionen herangezogen oder

maximale relative Änderungen der Wanddicken durch den Anwender vorgegeben. Eine detaillierte Beschreibung zur Ermittlung der Entwurfsvariablen und ihrer Grenzen ist in (Ortmann 2015) zu finden.

Die Abbruchkriterien der inneren Optimierungsschleife hängen vom gewählten Optimierungsansatz ab. Üblicherweise kommen hier Kriterien wie eine minimale Verbesserung der Zielfunktion, eine maximale Anzahl an Iterationen oder eine minimale Veränderung der Entwurfsvariablen zur Anwendung.

3.4 Softwarelösung zur Umsetzung des Optimierungsablaufs

Abbildung 3–10 zeigt schematisch die Softwarelösung zur Umsetzung des GHT-Optimierungsablaufs. Der Optimierungsablauf der GHT wird von der Software TOC (Topology Optimizer for Crashworthiness structures) gesteuert. Diese Software ist für den Ablauf der äußeren Optimierungsschleife mit der heuristikbasierten Topologieoptimierung verantwortlich. Zudem initiiert TOC den Aufruf der inneren Optimierungsschleifen und übergibt an diese den jeweiligen Graphen sowie die Optimierungsparameter. TOC kann über entsprechende Schnittstellen auf die Ergebnisse (Entwurfsvariablen, Zielfunktion, Restriktionen) der inneren Optimierungsschleifen zugreifen. Außerdem hat TOC Zugriff auf die FE-Ergebnisdaten, welche durch Funktionsaufrufe in der inneren Optimierungsschleife generiert werden.

Die Steuerung der inneren Optimierungsschleife wird von LS-OPT (Stander et al. 2015) durchgeführt. Für die Dimensionierungen und/oder Formoptimierungen in der inneren Optimierungsschleife werden die in LS-OPT implementierten Optimierungsalgorithmen verwendet (vgl. Abschnitt 3.3.2). LS-OPT variiert hierfür die Entwurfsvariablen im Graphen entsprechend des durch den Anwender gewählten Optimierungsansatzes und initiiert die Funktionsaufrufe.

Für jeden Funktionsaufruf wird automatisiert mittels der Software GRAMB (vgl. Abschnitt 3.1) ein neues FE-Modell der zu optimierenden Struktur erstellt und die entsprechenden Lastfälle integriert. Nachfolgend wird eine Crashsimulation mit PAMCRASH (ESI 2018) oder LS-DYNA (LSTC 2016) durchgeführt. Der Funktionsaufruf wird mit einem automatisierten Postprocessing (z.B. mit Animator4 (GNS 2020)) abgeschlossen. Hierbei werden die benötigten Strukturantworten extrahiert und der inneren Optimierungsschleife zur Verfügung gestellt.

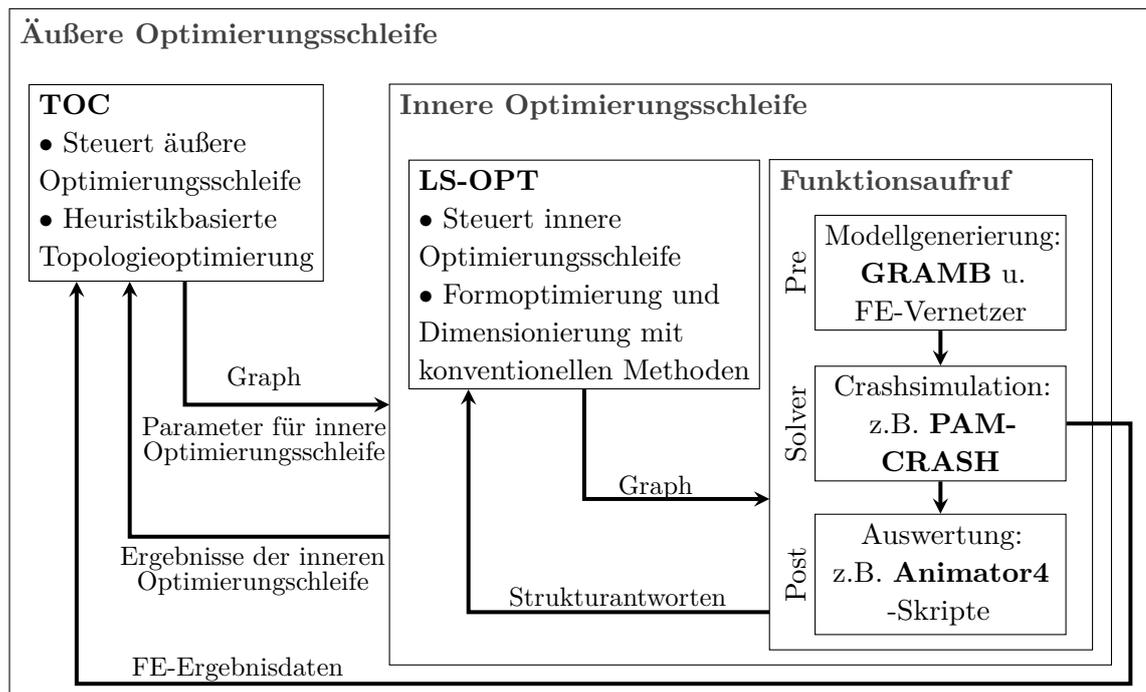


Abbildung 3–10: Softwarelösung zur Umsetzung des GHT-Optimierungsablaufs

Aufgrund der konkurrierenden Entwürfe der äußeren Optimierungsschleife sowie der verwendeten Algorithmen in der inneren Optimierungsschleife ist es möglich, die notwendigen Funktionsaufrufe der GHT zu einem gewissen Grad zu parallelisieren und den Optimierungsprozess somit zu beschleunigen. So ist es beispielsweise möglich, alle inneren Optimierungsschleifen einer Iteration der äußeren Optimierungsschleife parallel zu starten. In dieser inneren Optimierungsschleife können die Funktionsaufrufe einer Iteration mit SRSM ebenfalls parallel durchgeführt werden. Erst diese Parallelisierbarkeit ermöglicht, in Kombination mit der benötigten Anzahl an Funktionsaufrufen, die Anwendung auf industrielle Optimierungsproblemstellungen.

4 Automatische FE-Modellerzeugung von Profilstrukturen

Ziel der in diesem Kapitel vorgestellten Methoden ist es, die automatische FE-Modellerzeugung der GHT (vgl. Abschnitt 3.1) dahingehend zu erweitern, dass FE-Modellierungsdetails und Netzmodifikationen, welche signifikante Auswirkungen auf die Strukturantworten haben und zudem in industriellen Anwendungen etabliert sind, im Optimierungsprozess berücksichtigt werden können. Um die Sensitivität axial belasteter Crashstrukturen gegen kleine Änderungen der Modellierung zu verdeutlichen, wird zunächst eine Methode zum Aufbringen von geometrischen Imperfektionen auf Profilstrukturen vorgestellt und auf exemplarische Profilstrukturen unter axialer Crashbelastung angewendet.

Aufgrund von Fertigungsrestriktionen und Konstruktionsrichtlinien verfügen Extrusionsprofile in ihrem Querschnitt über verrundete Profilkanten und Materialansammlungen an Wandknoten. Sie beeinflussen die Strukturantworten von axial belasteten Extrusionsprofilen. Um diese im automatischen FE-Modellbildungsprozess der GHT zu berücksichtigen, werden zwei graphenbasierte Methoden zur automatisierten Erhöhung des Detailgrades der FE-Modelle in der GHT vorgestellt. Die erste Methode bringt automatisiert Verrundungen an Profilecken auf den Graphen auf, während die zweite Methode graphenbasiert Materialansammlungen an Wandknoten berechnet und diese auf das FE-Netz aufprägt.

Um Triggermechanismen im Optimierungsprozess der GHT heuristikbasiert aufbringen oder in der inneren Optimierungsschleife als Entwurfsvariablen nutzen zu können, müssen diese zum einen in die Graphensyntax integriert und zum anderen im Rahmen der automatisierten Modellbildung berücksichtigt werden. Das entsprechende Vorgehen wird in Abschnitt 4.3 aufgezeigt.

Alle in diesem Kapitel vorgestellten Methoden werden in GRAMB (vgl. Abschnitt 3.1) integriert. Einige der Anforderungen an die vorgestellten Methoden

sind sinngemäß aus den in (Stander und Craig 2002) aufgestellten Anforderungen an Methoden zur simulationsbasierten Optimierung abgeleitet. Diese werden im Folgenden aufgezählt. Die Methoden sollen zu einer signifikanten Verbesserung bei der automatisierten Modellerzeugung mit der GHT führen, wobei ein Kompromiss zwischen notwendiger Genauigkeit und Effizienz getroffen werden muss. Weiterhin von Bedeutung ist die Fähigkeit der Methoden robust mit vielfältigen Eingangsinformationen (z.B. unterschiedlichen Querschnittsbeschreibungen durch Graphen) umgehen zu können. Ziel ist, dass der automatisierte Ablauf der Optimierung nicht unterbrochen oder durch unbrauchbare Entwürfe negativ beeinflusst wird. Zudem soll die Anzahl der durch den Anwender zu definierenden Eingangsparameter möglichst gering gehalten und somit die Anwenderfreundlichkeit erhöht werden.

Die Ausführungen in diesem Kapitel wurden in (Sperber et al. 2019; Sperber et al. 2021) für diese Dissertation vorveröffentlicht. Neben der Beschreibung der Algorithmen sind dort insbesondere weitere Anwendungsbeispiele aufgezeigt.

4.1 Applikation geometrischer Imperfektionen

Um den Einfluss kleiner zufälliger Variationen der Struktureigenschaften auf das mechanische Verhalten von axial belasteten Profilstrukturen zu untersuchen, werden in der Literatur verschiedene Ansätze unter Verwendung von Zufallsfeldern vorgeschlagen. Häufig bilden diese Zufallsfelder Imperfektionen nach, welche in der Realität auftreten. Stefanou und Papadrakakis (2004) verwenden dabei stochastische Materialdaten und stochastische Wanddickenverteilungen. In (Schenk und Schuëller 2003) und (Fyllingen et al. 2007) werden Ansätze aufgezeigt, bei welchen die FE-Knotenkoordinaten der Profilwände mit stochastischen Verschiebungen, sogenannten geometrischen Imperfektionen, beaufschlagt werden. Insbesondere in Robustheitsbetrachtungen werden zudem noch weitere statistisch streuende Strukturparameter und Randbedingungen berücksichtigt (vgl. (Schwanitz 2016)).

Für die Entwicklung einer Methode zur Nutzung mit Profilstrukturen, welche in der GHT durch Topologiemodifikationen erzeugt werden, ist ein Ansatz erforderlich, der zum einen die Profilstruktur im Fokus hat, da nur diese durch GRAMB modifiziert werden kann. Stochastische Randbedingungen können folglich nicht mit GRAMB aufgeprägt werden. Zum anderen muss die Methode flexibel mit verschiedenen Querschnittsgeometrien umgehen können. Im Gegensatz zu einfachen Profilquerschnitten (z.B. quadratisches Einkammer-Profil) ist bei komplexen

Querschnittsgeometrien in der Regel nicht klar, in welcher spezifischen Deformationsform das Profil in der Realität deformieren würde. Das Aufprägen von Triggermechanismen mit kleiner Amplitude ist folglich im Allgemeinen ebenfalls nicht zielführend.

Es wird daher ein vergleichbarer Ansatz (stochastische Verschiebungen der FE-Knotenkoordinaten der Profilwände) wie in (Schenk und Schuëller 2003) und in (Fyllingen et al. 2007) gewählt, welcher um die Möglichkeit zur Behandlung beliebiger Querschnittstopologien erweitert wird. Dieser Ansatz wurde bereits in (Sperber et al. 2019) vorveröffentlicht. Es ist zu gewährleisten, dass der Ansatz auf ein effizientes Aufbringen von geometrischen Imperfektionen abzielt. Aus diesem Grund werden Vereinfachungen des ursprünglichen mathematischen Ansatzes aus (Shinozuka und Deodatis 1996) vorgenommen sowie weitere Annahmen getroffen. Eine abschließende Qualitätsevaluation der aufgeprägten geometrischen Imperfektionen ermöglicht eine statistische Kontrolle der stochastischen Eigenschaften.

4.1.1 Simulation stochastischer Felder

Die Methoden zur Verwendung von stochastischen Feldern in (Stefanou und Papadrakakis 2004; Fyllingen et al. 2007; Lönn et al. 2010) basieren auf Arbeiten von Shinozuka und Deodatis (1996). In diesen Arbeiten werden sogenannte 2D-1V Felder verwendet. Der eindimensionale Funktionswert des Zufallsfeldes (1V bzw. univariat) hängt dabei von einem zweidimensionalen Eingang (2D-Knotenkoordinaten in einem zweidimensionalen lokalen Koordinatensystem (x_1, x_2) auf der Oberfläche einer Wand) ab. In (Fyllingen et al. 2007) werden die geometrischen Imperfektionen sequenziell auf einzelne Wände aufgebracht. Aufgrund der rechten Winkel zwischen den Wänden besteht keine gegenseitige Beeinflussung der Amplituden der FE-Knotenverschiebung der einzelnen Wände, da diese jeweils orthogonal zur Wandebene erfolgen.

Unregelmäßige Mehrkammerstrukturen sind jedoch übliche Entwürfe im GHT-Optimierungsprozess. Folglich können an LINK-Knoten mehrere Kanten unter beliebigen Winkeln aufeinandertreffen. Ein 2D-1V Ansatz zum Aufbringen von Imperfektionen führt dabei zu Sprüngen und Interferenzen zwischen den Feldern der einzelnen Wände. Aus diesem Grund wird ein Ansatz verfolgt, in welchem zwei 3D-1V Felder überlagert werden. Die Eingangsparameter sind dabei die dreidimensionalen FE-Knotenkoordinaten in einem lokalen Profilkordinatensystem $(x_1, x_2,$

x_3). Die Funktionswerte des ersten Feldes werden für die stochastischen Auslenkungen der FE-Knotenkoordinaten in x_1 -Richtung der Profilebene genutzt, während die Funktionswerte des zweiten Feldes für die Auslenkungen in x_2 -Richtung herangezogen werden. Die x_3 -Richtung entspricht der Extrusionsrichtung (vgl. Abbildung 4-1).

Die Simulation der stochastischen Felder erfolgt über das Aufsummieren von Kosinus-Funktionen. Der Ansatz ist vergleichsweise rechenintensiv, ermöglicht im Gegensatz zu einem alternativen Ansatz mittels schneller Fourier-Transformation aber die flexible Handhabung von nicht äquidistanten FE-Netzen (Stefanou und Papadrakakis 2004). Der vorgestellte Ansatz orientiert sich am Ansatz von Shinozuka und Deodatis (1996), jedoch werden aus Effizienzgründen Annahmen und Vereinfachungen getroffen. Die Berechnung eines Funktionswertes eines spezifischen stochastischen Feldes i erfolgt nach Shinozuka und Deodatis (1996) dabei wie folgt:

$$\begin{aligned}
 f^{(i)}(x_1, x_2, x_3) = & \sqrt{2} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \sum_{n_3=0}^{N_3-1} \\
 & \left[A_{n_1 n_2 n_3}^{(1)} \cos\left(\kappa_{1n_1} x_1 + \kappa_{2n_2} x_2 + \kappa_{3n_3} x_3 + \Phi_{n_1 n_2 n_3}^{(1)(i)}\right) \right. \\
 & + A_{n_1 n_2 n_3}^{(2)} \cos\left(\kappa_{1n_1} x_1 + \kappa_{2n_2} x_2 + \kappa_{3n_3} x_3 + \Phi_{n_1 n_2 n_3}^{(2)(i)}\right) \\
 & + A_{n_1 n_2 n_3}^{(3)} \cos\left(\kappa_{1n_1} x_1 + \kappa_{2n_2} x_2 + \kappa_{3n_3} x_3 + \Phi_{n_1 n_2 n_3}^{(3)(i)}\right) \\
 & \left. + A_{n_1 n_2 n_3}^{(4)} \cos\left(\kappa_{1n_1} x_1 + \kappa_{2n_2} x_2 + \kappa_{3n_3} x_3 + \Phi_{n_1 n_2 n_3}^{(4)(i)}\right) \right] . \quad (4-1)
 \end{aligned}$$

Für jedes stochastische Feld ist die Erstellung eines Satzes von unabhängigen und zufälligen Phasenverschiebungen notwendig:

$$\Phi_{n_1 n_2 n_3}^{(j)(i)} \in [0, 2\pi] \quad (j = 1, 2, 3, 4) . \quad (4-2)$$

Die Berechnung der Amplituden in Gleichung 4-1 erfolgt nach Shinozuka und Deodatis (1996) über

$$A_{n_1 n_2 n_3}^{(j)} = \sqrt{2S_{ff}(\kappa_{1n_1}, \kappa_{2n_2}, \kappa_{3n_3}) \Delta\kappa_1 \Delta\kappa_2 \Delta\kappa_3} , \quad (4-3)$$

wobei S_{ff} die Funktion der spektralen Leistungsdichte (Power Spectral Density Function) darstellt. Aus (Shinozuka und Deodatis 1996) ist eine entsprechende Formel für einen 3D-1V-Ansatz bekannt. Diese gilt für $N_{\{1,2,3\}} \rightarrow \infty$. Aus Effizienzgründen kann an dieser Stelle jedoch nur eine endliche Anzahl verwendet werden. Als zielführender Kompromiss hat sich $N_{\{1,2,3\}} = 25$ erwiesen. $n_{\{1,2,3\}}$ sind dabei die Zählvariablen.

Um stochastische Felder mit einer Standardabweichung σ_{ff} zu erzeugen, wird die Funktion für die spektrale Leistungsdichte, basierend auf empirischen Untersuchungen, wie folgt angepasst:

$$S_{ff}(\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3) = \sigma_{ff}^2 \frac{b_1 b_2 b_3}{16\pi} \exp \left[- \left(\frac{b_1 \kappa_1}{2} \right)^2 - \left(\frac{b_2 \kappa_2}{2} \right)^2 - \left(\frac{b_3 \kappa_3}{2} \right)^2 \right]. \quad (4-4)$$

Die Parameter b_1 , b_2 und b_3 sind dabei proportional zur Korrelationslänge des stochastischen Feldes in der x_1 -, x_2 - und x_3 -Richtung. Sie steuern somit die jeweils mittlere Wellenlänge des stochastischen Feldes in x_1 -, x_2 - und x_3 -Richtung. Da x_1 und x_2 in der Querschnittsebene definiert sind, wird für b_1 und b_2 der gleiche Parameter b_{pro} verwendet. Für b_3 , welcher sich auf die Korrelationslänge in Extrusionsrichtung bezieht, wird der Parameter b_{ext} verwendet. Weiter gilt für die Wellenzahlen $\kappa_{\{1,2,3\}n_{\{1,2,3\}}}$ nach Shinozuka und Deodatis (1996)

$$\begin{aligned} \kappa_{1n_1} &= n_1 \Delta \kappa_1, & \Delta \kappa_1 &= \frac{\kappa_{1u}}{N_1}, \\ \kappa_{2n_2} &= n_2 \Delta \kappa_2, & \Delta \kappa_2 &= \frac{\kappa_{2u}}{N_2}, \\ \kappa_{3n_3} &= n_3 \Delta \kappa_3, & \Delta \kappa_3 &= \frac{\kappa_{3u}}{N_3}. \end{aligned} \quad (4-5)$$

Zur vereinfachten Berechnung der oberen Grenzwellenzahlen $\kappa_{\{1,2,3\}u}$ wird die folgende Approximation angenommen:

$$\kappa_{\{1,2,3\}u} = 4.43 \cdot \min(b_j)^{-0.918}. \quad (4-6)$$

4.1.2 Aufbringen auf FE-Netze von Profilstrukturen

Die Wahl geeigneter Eingangsparameter ist essenziell für die Anwendung von geometrischen Imperfektionen. Aus (Lönn et al. 2010) sind entsprechende Parameter für Aluminium-Strangpressprofile, welche an Fertigungstoleranzen angelehnt sind, bekannt. Sie sind in Tabelle 4–1 angegeben. Diese Parameter werden für alle Anwendungen in der vorliegenden Arbeit verwendet.

Tabelle 4–1: Parameter für die Funktion der spektralen Leistungsdichte für lokale Imperfektionen aus (Lönn et al. 2010)

Imperfektion	σ_{ff} in mm	b_{pro} in mm	b_{ext} in mm
Lokal	0.07	40	400

Abbildung 4–1 zeigt die exemplarische Anwendung von geometrischen Imperfektionen auf eine Mehrkammer-Profilstruktur. Zur besseren Visualisierung der Amplituden wird ein unrealistisch großer Wert für σ_{ff} verwendet.

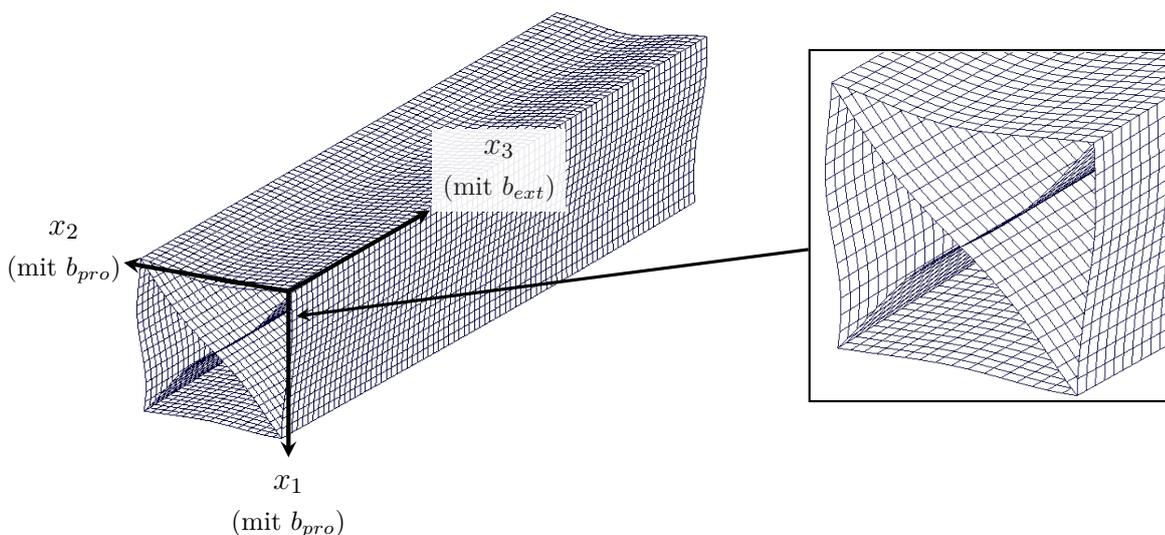


Abbildung 4–1: Mehrkammer-Profil mit geometrischen Imperfektionen
($\sigma_{ff} = 3.5$ mm, $b_{pro} = 40$ mm, $b_{ext} = 400$ mm)

Der Ablauf für das Aufbringen der stochastischen Felder auf ein FE-Modell einer Profilstruktur ist in Abbildung 4–2 dargestellt. Die Methode ist derart implementiert, dass das stochastische Feld ebenfalls auf Profilstrukturen, welche entlang eines dreidimensionalen Splines extrudiert werden, aufgebracht werden kann. Dafür wird in jedem Querschnitt auf dem Spline ein lokales Koordinatensystem bestimmt. Der x_3 -Vektor zeigt dabei in die jeweilige lokale Extrusionsrichtung, während die

x_1 - und x_2 -Vektoren in der Querschnittsebene liegen. Um den korrekten Funktionswert in x_3 -Richtung zu erhalten und das Feld an das Profil anzuschmiegen, entspricht der x_3 -Wert der Länge des Splines von einem Profilende zu diesem Querschnitt auf dem Spline.

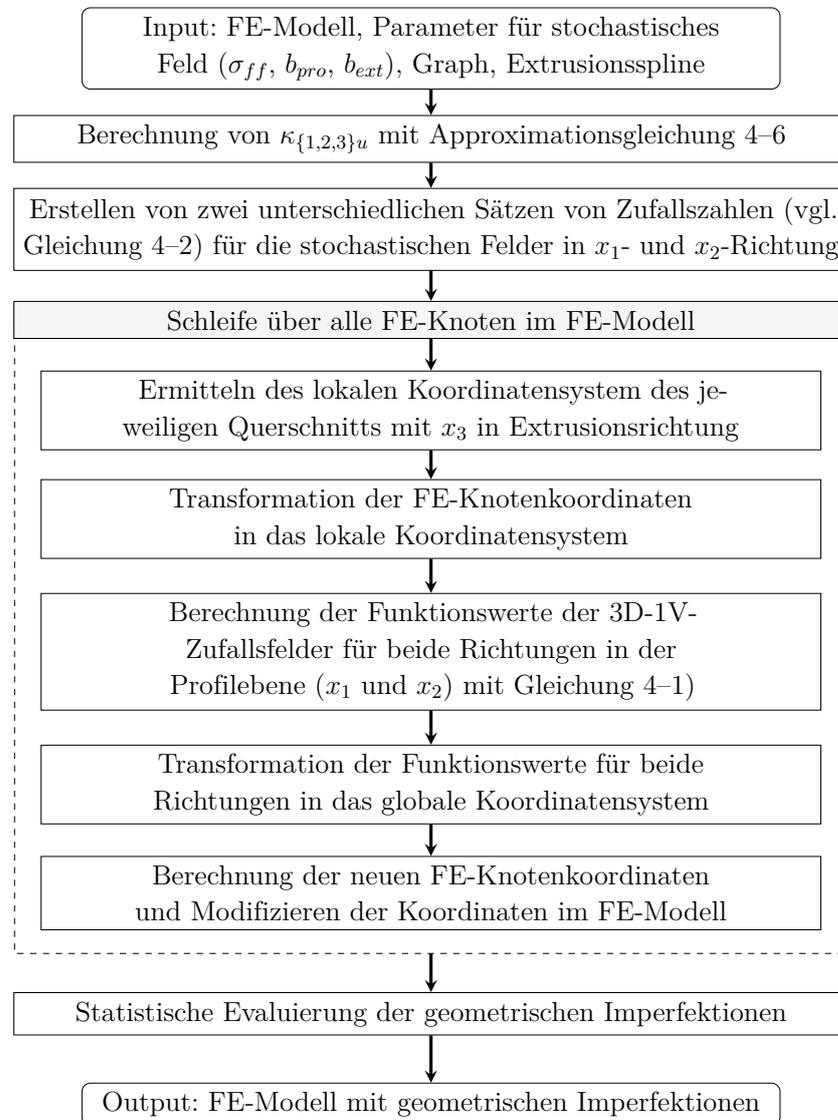


Abbildung 4–2: Ablaufdiagramm zum Aufbringen von geometrischen Imperfektionen auf eine Profilstruktur

4.1.3 Einfluss geometrischer Imperfektionen

Um den Einfluss von geometrischen Imperfektionen auf das Deformationsverhalten zu ermitteln, werden verschiedene Profilstrukturen mit unterschiedlichen Querschnittsgeometrien (vgl. Abbildung 4–3) in einem Fallturm-Lastfall untersucht

(vgl. Abbildung 2–10). Die Profilstrukturen haben eine Länge von 400 mm und verfügen über eine Masse von 1 kg.

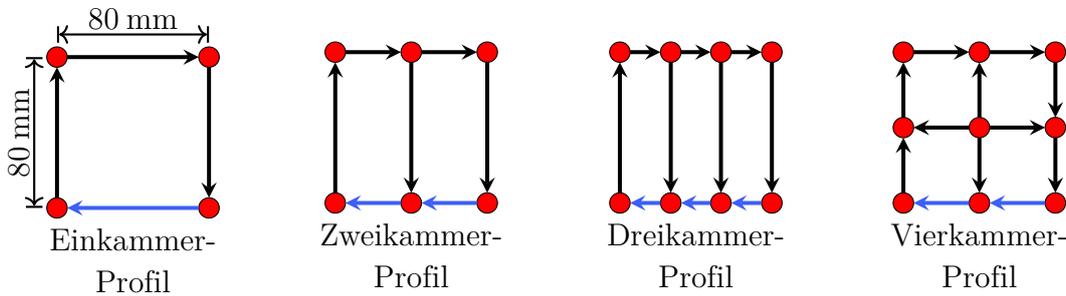


Abbildung 4–3: Untersuchte Profilquerschnitte (die zuerst crashbelastete Seite in Lastfällen mit Impaktorneigung ist blau hervorgehoben)

Als Material wird die Aluminiumlegierung A6XXX T6 (Aluminium-Magnesium-Silizium-Legierung) mit einer Fließgrenze von $\sigma_f = 280$ MPa (vgl. Abbildung 4–4 bzw. Tabelle 4–2) verwendet. Die Diskretisierung der Profilstrukturen erfolgt mit Belytschko–Tsay-Schalenelementen mit einer Elementkantenlänge von 5 mm. Der Impaktor besitzt eine Masse von 300 kg und eine initiale Geschwindigkeit von $v_{Imp,0} = 10 \frac{m}{s}$. Als Impaktorneigungswinkel werden 0° und 5° untersucht. Die Berechnung erfolgt mit PAMCRASH v2018 (ESI 2018).

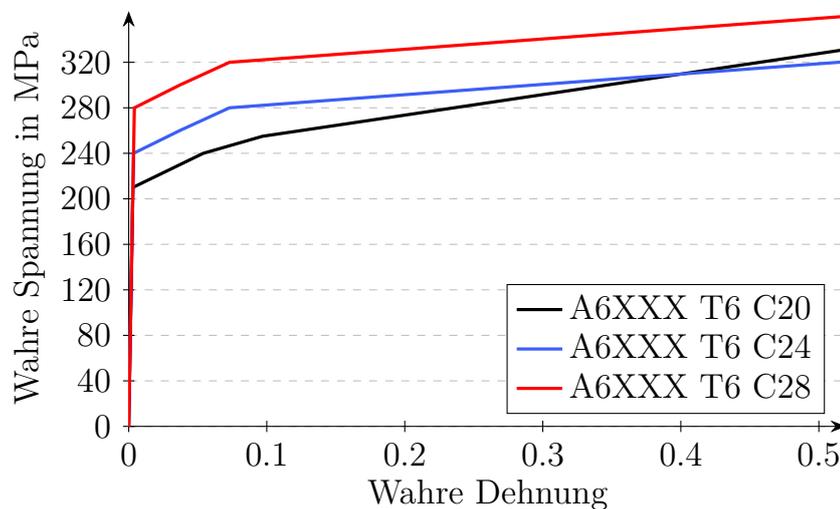


Abbildung 4–4: Spannungs-Dehnungs-Kurven verschiedener A6XXX T6 Aluminiumlegierungen

Als Parameter für die geometrischen Imperfektionen werden die Werte aus Tabelle 4–1 gewählt. Für die untersuchten Profilquerschnitte wird für beide Impaktorneigungen jeweils eine Berechnung mit einer ideal modellierten Profilgeometrie und

Tabelle 4–2: Materialkennwerte verschiedener A6XXX T6 Aluminiumlegierungen

Materialkennung	Elastizitätsmodul (E) in GPa	Fließspannung (σ_f) in MPa	Bruchdehnung (ϵ_b)	Poissonzahl (ν)	Dichte (ρ) in $\frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}$
A6XXX T6 C20	69	210	0.1	0.3	$2.75 \cdot 10^{-6}$
A6XXX T6 C24	69	240	0.1	0.3	$2.75 \cdot 10^{-6}$
A6XXX T6 C28	69	280	0.1	0.3	$2.75 \cdot 10^{-6}$

zehn Rechnungen mit geometrischen Imperfektionen durchgeführt. Für jede dieser Simulationen werden jeweils neue geometrische Imperfektionen aufgebracht.

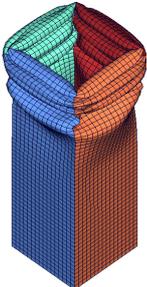
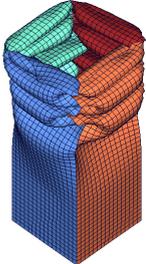
Quadratische Profilstruktur mit idealer FE Geometrie		Quadratische Profilstruktur mit geometrischen Imperfektionen		
Undeformiert	Deformiert ($d_{max} = 149.0 \text{ mm}$)	Undeformiert (SF=1)	Imperfektionen visualisiert (SF=36)	Deformiert ($d_{max} = 184.3 \text{ mm}$)
				

Abbildung 4–5: Einfluss von geometrischen Imperfektionen auf das Deformationsverhalten der quadratischen Profilstruktur, mit Skalierungsfaktor SF für die Amplituden der Imperfektionen (modifiziert aus (Sperber et al. 2019))

Abbildung 4–5 zeigt das Deformationsverhalten einer ideal modellierten quadratischen Profilstruktur im Lastfall mit 0° Impaktorneigung. Dem gegenübergestellt ist das Deformationsbild einer typischen Rechnung mit geometrischen Imperfektionen. Zunächst lässt sich feststellen, dass sich die Deformationsform für die dargestellten Strukturen unterscheidet. Während bei der ideal modellierten Struktur eine extensionale Deformationsform dominiert, weist die Struktur mit geometrischen Imperfektionen eine symmetrische Deformationsform auf (vgl. Abschnitt 2.2.1 bzw. Abbildung 2–11).

Tabelle 4–3 zeigt den Einfluss der geometrischen Imperfektionen auf die Intrusionswerte der untersuchten Strukturen. Der größte Einfluss (+26 %) lässt sich für das quadratische Profil unter direkter axialer Belastung feststellen. Ursächlich hierfür ist der Unterschied in der Deformationsform. Mit zunehmendem Impaktorneigungswinkel und folglich einer asymmetrischen Lasteinleitung, bei welcher der Impaktor zudem nicht direkt auf die gesamte Querschnittsfläche des Profils aufschlägt, reduziert sich der relative Unterschied im Vergleich zwischen der Intrusion bei idealer und dem Durchschnitt der Intrusionen bei imperfekter Modellierung auf 3.2 %.

Tabelle 4–3: Einfluss von geometrischen Imperfektionen auf die Intrusionswerte verschiedener Profilstrukturen (mit Standardabweichung SD)

Struktur	Impaktor- neigungs- winkel	Intrusionen in mm			Differenz
		ideale Modellierung	geom. Imperfektionen \bar{x}	SD	
Einkammer- Profil	0°	149.0	187.8	11.4	26.0 %
	5°	197.1	203.4	2.9	3.2 %
Zweikammer- Profil	0°	155.0	151.8	4.0	-2.1 %
	5°	156.6	157.4	2.9	0.8 %
Dreikammer- Profil	0°	146.6	151.7	3.9	3.5 %
	5°	156.1	156.1	2.8	0.0 %
Vierkammer- Profil	0°	120.4	121.7	2.0	1.1 %
	5°	129.0	127.0	0.8	-1.6 %

Der Einfluss der geometrischen Imperfektionen auf das Deformationsverhalten der Mehrkammer-Strukturen ist sowohl bei direkt axialer als auch bei schräger Belastung, verglichen mit dem Einfluss auf das quadratische Einkammer-Profil, gering. Bei Betrachtung der Deformationen können unterschiedliche Faltenbeulformen beobachtet werden. Eine Unterteilung in Deformationsformen mit signifikanten Unterschieden in den Energieabsorptionseigenschaften, wie sie beispielsweise zwischen der symmetrischen und der extensionalen Deformationsform festgestellt werden können, ist jedoch nicht möglich. Teilweise können sogar Versteifungen bei Profilstrukturen mit geometrischen Imperfektionen im Vergleich zu ideal modellierten Strukturen festgestellt werden. Ursächlich hierfür ist das nichtlineare Strukturverhalten und die Initiierung anderer Faltenbeulformen.

4.2 Berücksichtigung geometrischer Details

Während Ansätze zur Vereinfachung von CAD-Modellen zur effizienten Nutzung in Simulationen weit verbreitet sind (Überblick in (Thakur et al. 2009)), ist die automatische Modellierung von geometrischen Details in FE-Modellen ein Feld mit Forschungsbedarf. Als benachbartes Fachgebiet kann jedoch das Knowledge Based Engineering (KBE) gesehen werden, in welchem die automatische CAD-Modellierung mit minimalen Benutzereingaben das Ziel ist. Ein Überblick hierzu findet sich in (Stjepandić et al. 2015).

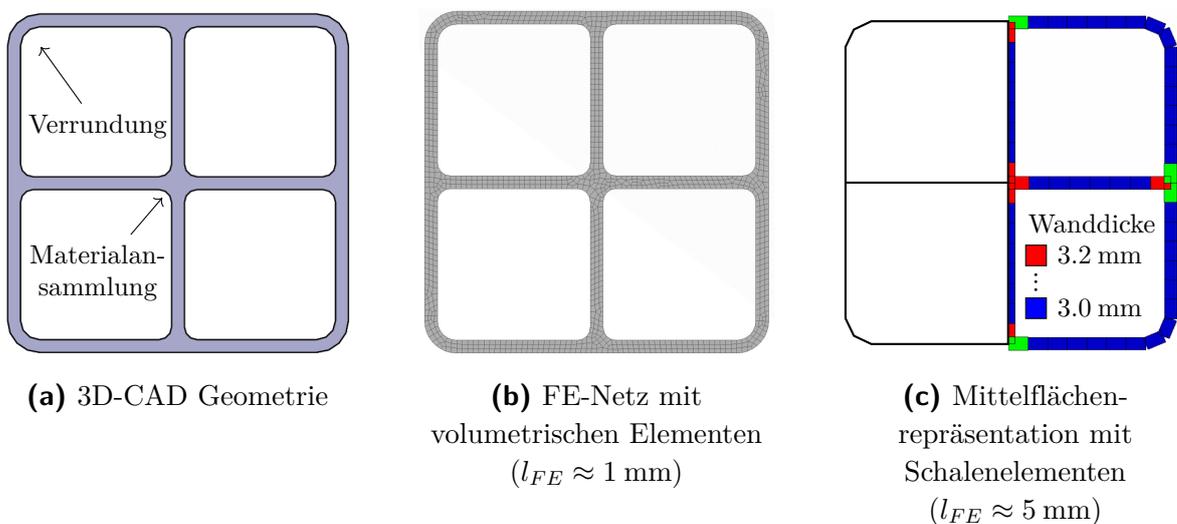


Abbildung 4–6: Verschiedene Repräsentationen der Querschnittsgeometrie eines Extrusionsprofils (modifiziert aus (Sperber et al. 2021))

Ein wichtiges Ziel bei der Anwendung der Finite Elemente Methode zur Simulation von Fahrzeugstrukturen unter Crashbelastung ist es, kostenintensive Crashversuche im Fahrzeugentwicklungsprozess einzusparen. Dafür ist eine hohe Prognosegüte notwendig (Wellkamp 2019). Aufgrund von Fertigungsrestriktionen und Konstruktionsrichtlinien (Mital et al. 2014; Ostermann 2014) verfügen stranggepresste Aluminiumprofile über Verrundungen und Materialansammlungen im Profilquerschnitt. Diese werden in CAD-Konstruktionsmodellen berücksichtigt (vgl. Abbildung 4–6). Anstelle von Volumenelementen mit kleiner Elementkantenlänge werden für die Diskretisierung von dünnwandigen Profilstrukturen in der Crashsimulation üblicherweise Schalenelemente eingesetzt, deren Elementkantenlänge ein Kompromiss aus Abbildungsgenauigkeit und Recheneffizienz ist (vgl. Abschnitt 2.1.3). (Geometrische) Vereinfachungen sollten daher nur insoweit vorgenommen werden, wie es für den zuvor genannten Kompromiss notwendig ist (Meywerk 2007). Die idealtypische Ableitung eines Mittelflächenmodells aus einem

dreidimensionalen CAD-Modell erfolgt mittels kommerzieller Software (bspw. mit ANSA (BETA 2019)). Sie führt zu einer Berücksichtigung von Verrundungen und Materialansammlungen über die Knotenverschiebungen und Modifikationen der Elementdicken.

Für eine Berücksichtigung dieser Details im automatisierten Optimierungsprozess der GHT müssen daher Algorithmen entwickelt werden, welche diese, basierend auf der Graphenbeschreibung, berechnen und auf das FE-Modell aufbringen. Ziel ist es, dass im Optimierungsprozess der GHT FE-Modelle von Profilen genutzt werden können, welche einen ähnlichen Detaillierungsgrad besitzen wie FE-Modelle, die in der regulären mechanischen Funktionsauslegung von Fahrzeugen Verwendung finden. Gleichzeitig sollen diese Algorithmen prozesssicher mit verschiedensten Querschnittsgeometrien umgehen können und möglichst wenige Eingangsparameter haben.

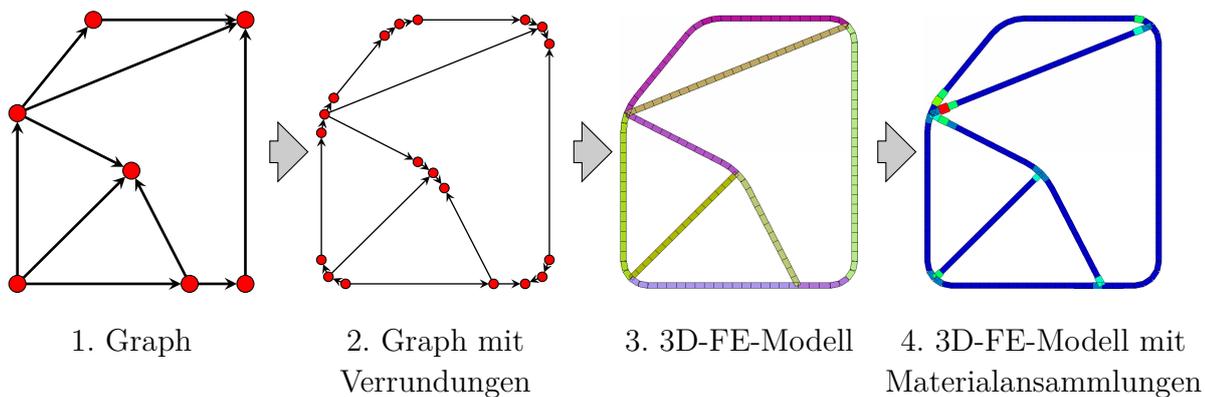
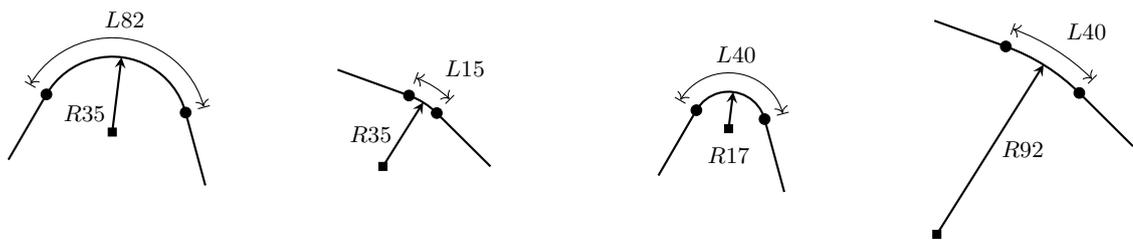


Abbildung 4–7: Schematische Darstellung der Aufbringung von Verrundungen und Materialansammlungen auf eine Profilstruktur mit GRAMB (FE-Modelle mit Querschnittsdarstellung und visualisierter Schalendicke)

Der grundlegende Ablauf zur Aufbringung der geometrischen Details mit GRAMB ist in Abbildung 4–7 für eine exemplarische Profilstruktur dargestellt. Ausgehend vom Entwurfsgraphen (1.), welcher für die heuristikbasierte Topologieoptimierung benötigt wird, werden zunächst die Verrundungen auf den Graphen aufgebracht (2.). Anschließend wird das FE Modell erzeugt (3.). Basierend auf graphenbasierten Berechnungen werden abschließend die Materialansammlungen als Modifikation der Elementdicken auf das FE-Modell aufgebracht (4.). Die Algorithmen zum Aufbringen der Verrundungen und der Materialansammlungen werden nachfolgend beschrieben.

4.2.1 Verrundungen an Profilkanten

Im Konstruktionsprozess von Extrusionsprofilen werden Verrundungen (Rounded Corners - RC) üblicherweise als unterschiedliche Radien auf die Innen- und Außen-seite der jeweiligen Profilecken aufgebracht. Die Radien sind dabei abhängig von den Waddicken, dem Winkel zwischen den Wänden, der Anzahl der angrenzenden Wände sowie der Lage der angrenzenden Wände (an der Profilaußenseite oder im Inneren des Profils). Die Wahl eines einzigen Radius r als Eingangsparameter für die Verrundungen am Graphen würde zu ungleichmäßigen Verrundungen an Kanten mit einem eingeschlossenen spitzen oder einem eingeschlossenen stumpfen Winkel führen. Abbildung 4–8 (a) und (b) verdeutlichen dies. Insbesondere an spitzen Winkeln würde zudem die ursprüngliche Geometrie stark verändert werden, da vergleichsweise viel Material an den Ecken weggenommen werden würde.

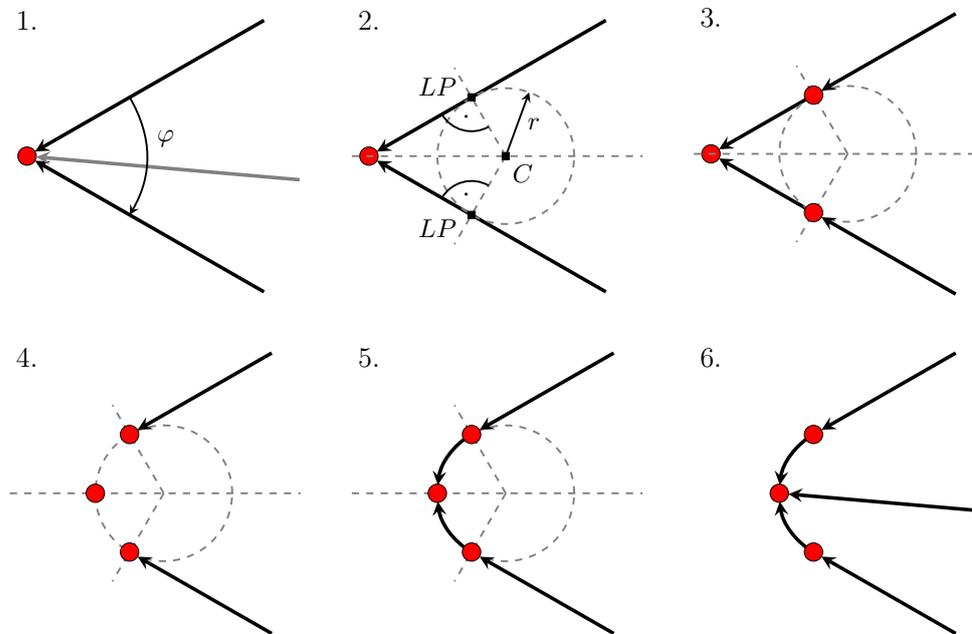


(a) Radius ($R35$) bei einem spitzen Winkel (45°) (b) Radius ($R35$) bei einem stumpfen Winkel (155°) (c) Bogenlänge ($L40$) bei einem spitzen Winkel (45°) (d) Bogenlänge ($L40$) bei einem stumpfen Winkel (155°)

Abbildung 4–8: Auswirkungen der Verwendung von gleichem Verrundungsradius ((a) und (b)) oder gleicher Bogenlänge ((c) und (d)) auf Kanten, welche in einem spitzen oder stumpfen Winkel aufeinander treffen (modifiziert aus (Sperber et al. 2021))

Aus diesem Grund wird in (Sperber et al. 2021) die Bogenlänge b als Steuerungsparameter für die Verrundungen vorgeschlagen (vgl. Gleichung 4–7). Dieses Vorgehen bietet zum einen den Vorteil, dass der Verrundungsradius r abhängig vom Winkel φ zwischen den Kanten ist und folglich gleichmäßigere Verrundungen ähnlich dem Konstruktionsprozess aufgebracht werden (vgl. Abbildung 4–8 (c) und (d)). Ein weiterer Vorteil für den Vernetzungsprozess in GRAMB ist, dass über die Wahl der Bogenlänge die Diskretisierung gesteuert werden kann. Die Wahl einer Bogenlänge, welche dem zweifachen der Zielelementkantenlänge entspricht, führt zu einer Vernetzung der Verrundung mit zwei annähernd quadratischen Schalenelementen im Querschnitt. Für Flexibilität sorgt die Möglichkeit unterschiedliche Bogenlängen für Verrundungen an Außen- und Innenkanten (vgl. Abschnitt 3.1) vorzugeben.

$$b = \frac{r \pi \varphi}{180^\circ} \quad (4-7)$$



1. Ausgangssituation: Drei Kanten an einem LINK-Knoten, $\varphi < 180^\circ$
2. Bestimmen der beiden äußersten Kanten, des Verrundungsmittelpunkts (C) und der Lotfußpunkte (LP) auf den äußeren Kanten
3. Aufteilen der beiden äußeren Kanten am jeweiligen Lotfußpunkt
4. Erzeugen eines LINK-Knotens auf dem Mittelpunkt auf der Verrundung
5. Berechnen der Kantenkrümmung und Erzeugen von zwei Kanten als Verrundung
6. Verbinden der eingeschlossenen Kante mit dem Mittelpunkt auf der Verrundung

Abbildung 4-9: Graphenbasiertes Aufbringen einer Verrundung

Abbildung 4-9 zeigt das detaillierte graphenbasierte Vorgehen bei einer Verrundung an einem LINK-Knoten mit drei verbundenen Kanten. Vor dem Aufbringen der Verrundung wird überprüft, ob die äußersten Kanten einen Winkel $\varphi < 180^\circ$ einschließen. Das Erfüllen dieser Bedingung ist notwendig, da bei $\varphi = 180^\circ$ die beiden äußeren Kanten kollinear sind und somit keine Verrundung aufgebracht werden kann. Bei mehr als zwei Kanten ist bei $\varphi > 180^\circ$ zudem nicht eindeutig bestimmt, auf welche Kanten die Verrundung aufgebracht werden soll. Üblicherweise wird hier keine Verrundung aufgebracht. LINK-Knoten, an denen diese Situation auftritt, werden jedoch beim Aufbringen der in Abschnitt 4.2.2 vorgestellten Materialansammlungen berücksichtigt. Das Ablaufdiagramm für den gesamten Verrundungsprozess ist in Abbildung 4-10 dargestellt. Die Begriffe *äußere Kante*

und *innere Kante* beziehen sich dabei auf die Definitionen in Abschnitt 3.1. Die Anwendung der Verrundungen auf einen exemplarischen Graphen ist in Abbildung 4–7 dargestellt.

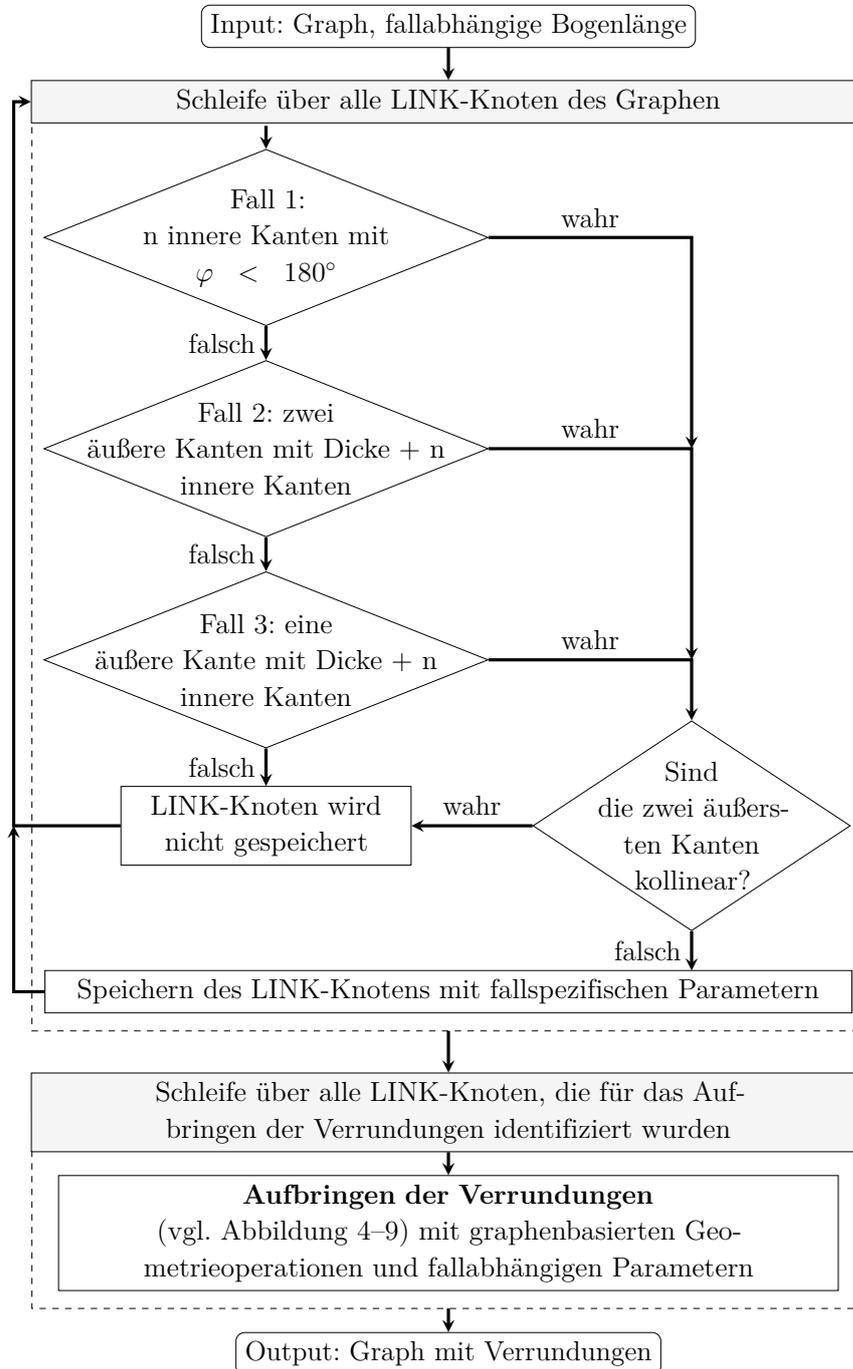


Abbildung 4–10: Ablaufdiagramm zum Aufbringen von Verrundungen auf einen Graphen (modifiziert aus (Sperber et al. 2021))

4.2.2 Materialansammlungen an Wandknoten im Profilquerschnitt

Bei der Konstruktion der Querschnittsgeometrie von Extrusionsprofilen werden an Wandknotenpunkten (Punkte, an denen mehr als zwei Wände aufeinandertreffen) üblicherweise Radien zwischen den Wänden eingebracht. Diese führen zu Materialansammlungen (Material Accumulations - MA) an den Knotenpunkten (vgl. Abbildung 4–6). Da die Unterschiede zwischen den Radien im Konstruktionsprozess jedoch häufig gering sind, wird zur Vereinfachung ein einheitlicher Radius als Eingangsparmeter für einen Algorithmus gewählt, der diese Materialansammlungen automatisch ermittelt und aufbringt.

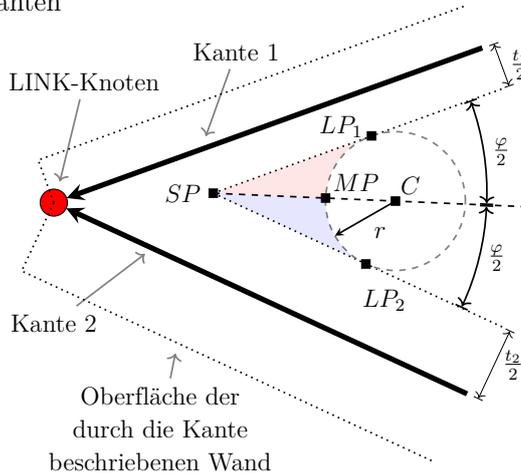
Im ersten Schritt erfolgt die graphenbasierte Berechnung der Materialansammlungen. Hierfür werden im Graphen alle LINK-Knoten mit drei oder mehr Kanten ermittelt. An diesen LINK-Knoten werden jeweils Kantenpaare benachbarter Kanten gebildet, an welchen die Materialansammlungen berechnet werden. Zwischen benachbarten Kanten mit einem eingeschlossenen Winkel $\geq 180^\circ$ werden keine Materialansammlungen berücksichtigt. Für alle anderen Kantenpaare erfolgt die Berechnung der Materialansammlungen wie in Abbildung 4–11 beschrieben.

Zur Speicherung der Informationen zu den zusätzlichen Wanddicken wird jede Kante in Abschnitte diskretisiert. Die Länge der Abschnitte in Kantenrichtung entspricht dabei der Zielkantenlänge des FE-Vernetzers im GRAMB-Prozess. Jedem Abschnitt wird zudem seine normierte Position ($0 \leq p \leq 1$) auf der jeweiligen Kante zugewiesen.

Das Ergebnis der Berechnung für beide Kanten eines Paares ist die Information über die zusätzlichen Dicken an den jeweiligen normierten Positionen auf beiden Kanten. Im Berechnungsprozess werden Dickeninformationen aus unterschiedlichen Kantenpaarungen akkumuliert. Zudem werden die Dickeninformationen einer Kante aus der Berechnung der Materialansammlungen an unterschiedlichen LINK-Knoten zusammengeführt. Das Ergebnis ist ein Datensatz, bei dem für jede Kante die zusätzlichen Dicken an den normierten Positionen gespeichert sind.

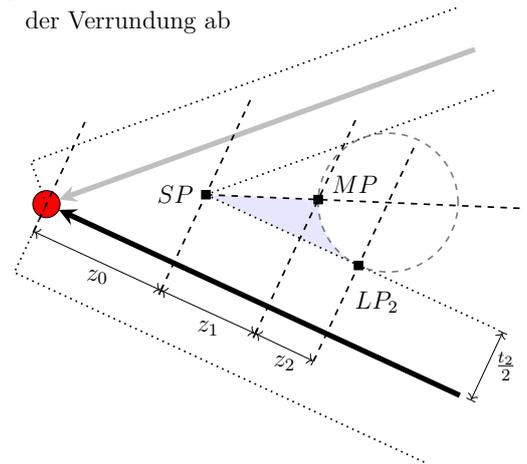
Im zweiten Schritt werden die Materialansammlungen als zusätzliche Schalen-elementdicke ohne weitere Netzmodifikationen auf das FE-Modell aufgebracht. Nach dem Einlesen des FE-Modells ohne Materialansammlungen wird für den Mittelpunkt jedes Finiten Elements die entsprechende Kante im Graphen und dort die normierte Position auf der Kante ermittelt. Anschließend wird die entsprechende berechnete Dicke an der jeweiligen normierten Position der Kante dem

1. Graphenbasierte Berechnung des zusätzlichen Materials (blaue und rote Fläche) zwischen zwei Kanten

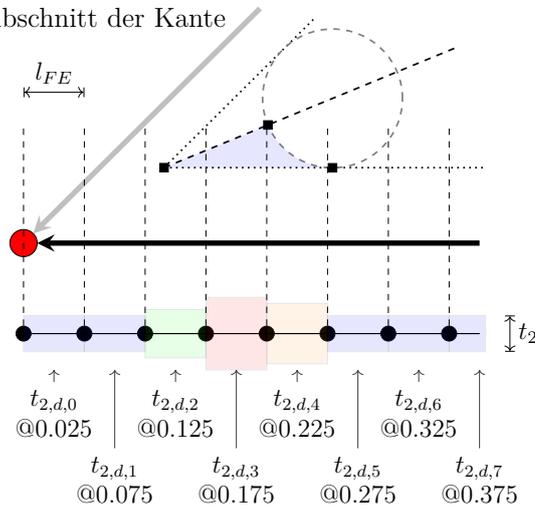


2. Zonen unterschiedlicher Flächenberechnung

- z_0 : kein zusätzliches Material
- z_1 : zusätzliches Material nimmt linear zu
- z_2 : zusätzliches Material nimmt entlang der Verrundung ab



3. Abbildung der berechneten Flächen als zusätzliche Wanddicke auf einen diskreten Abschnitt der Kante



t_i	Dicke der Kante i
φ	Winkel zwischen den beiden Kanten
SP	Schnittpunkt der virtuellen Oberflächen zwischen den Kanten
C	Mittelpunkt der Verrundung
r	Radius der Verrundung
MP	Mittelpunkt auf der Verrundung
LP	Lotfußpunkt vom Verrundungsmittelpunkt auf die Oberfläche der durch die Kante beschriebenen Wand
l_{FE}	Zielkantenlänge für Vernetzung mit Schalenelementen
$t_{i,d} @ p$	Dicke eines diskreten Abschnitts an der normierten Position p der Kante i

Abbildung 4–11: Graphenbasierte Bestimmung der Materialansammlung an einer Kante und Abbilden der Dickeninformation auf diskrete Abschnitte (modifiziert aus (Sperber et al. 2021))

Finite Element zugewiesen. Das Ergebnis ist ein FE-Modell der Profilstruktur mit Materialansammlungen als zusätzliche Wanddicken der Schalenelemente. Das Ablaufdiagramm zur Aufbringung von Materialansammlungen mit GRAMB ist in Abbildung 4–12 dargestellt. Für unregelmäßige FE-Netze (z.B. durch Neuvernetzungen oder der Extrusion entlang eines Spline) werden kubisch hermitesche Splines zur Interpolation zwischen den diskreten Dickeninformationen eingesetzt (vgl. (Sperber et al. 2021)). Abbildung 4–7 zeigt die Anwendung der Materialansammlungen auf eine exemplarische Profilstruktur.

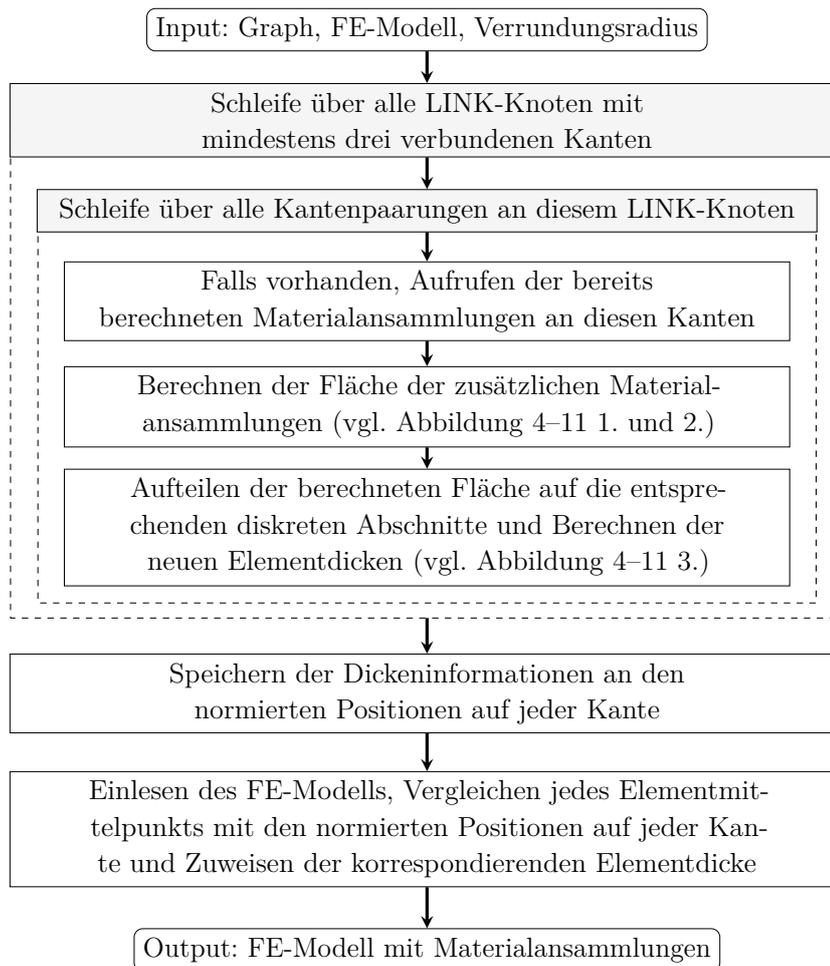


Abbildung 4–12: Ablaufdiagramm zum Aufbringen von Materialansammlungen (modifiziert aus (Sperber et al. 2021))

4.3 Parameterbasierte Modellierung von Triggermechanismen

Nicht alle in Abschnitt 2.2.3 vorgestellten Triggermechanismen erfüllen die Anforderungen für eine industrielle Anwendung in der Automobilindustrie, welche auf eine kostengünstige Fertigung bei gleichzeitig signifikantem Einfluss auf die Crasheigenschaften abzielt. Da Verprägungen und Ausschnitte diese Anforderungen erfüllen, zählen sie zu den am häufigsten eingesetzten Triggermechanismen bei axial belasteten Aluminium-Strangpressprofilen. Neben Verprägungen und Ausschnitten erscheinen Anfasungen aufgrund der Erfüllung dieser Anforderungen ebenfalls geeignet für eine automobiler Anwendung, wenngleich sie weniger verbreitet sind. Diese drei Arten von Triggermechanismen werden in jeweils zwei Varianten in den automatischen FE-Modellbildungsprozess mit GRAMB integriert. Sie sind exemplarisch in Abbildung 4–13 dargestellt. Die implementierten Triggermechanismen sind über das Verschieben von FE-Knoten, das Löschen von Finiten Elementen sowie Änderungen der Dicke der Schalenelemente realisiert.

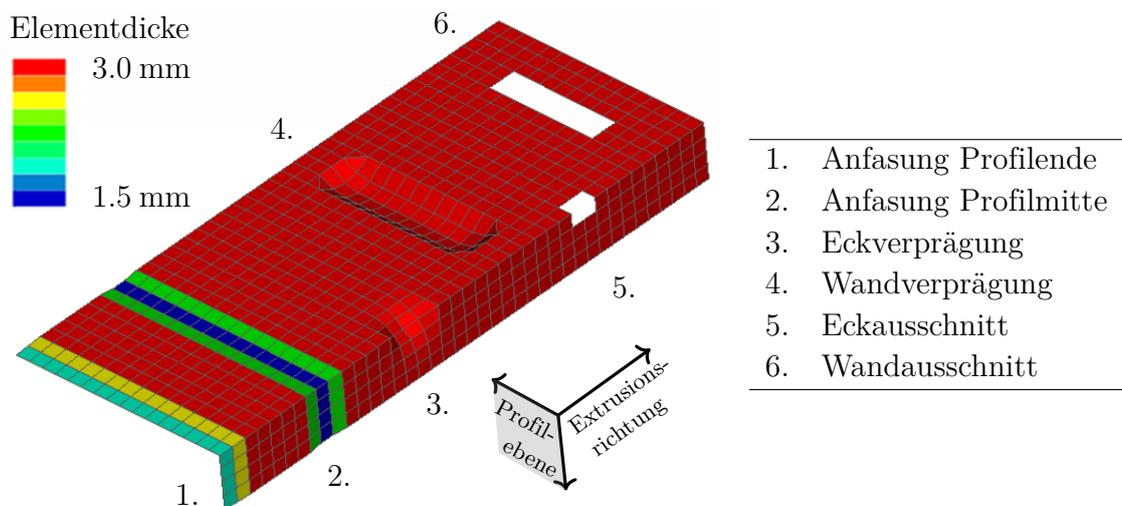


Abbildung 4–13: Anwendung der implementierten Trigger auf einen exemplarischen Profilausschnitt (modifiziert aus (Sperber et al. 2019))

Für eine Verwendung im Optimierungsprozess der GHT werden die Trigger parameterbasiert und der FE-Vernetzung nachgeschaltet auf das FE-Modell aufgebracht. Die Entwicklung neuer Methoden zur Netzmodifikation liegt darin begründet, dass zum einen eine Verknüpfung zwischen dem Graphen und dem FE-Modell notwendig ist und zum anderen aus Gründen der Flexibilität eine von kommerzieller FE-Vernetzungssoftware unabhängige Lösung geschaffen werden soll. Die

genauen Parameter unterscheiden sich zwischen den Triggervarianten und werden in den folgenden Abschnitten erläutert. Allen Triggern ist gemein, dass der Ort ihrer Aufbringung in Extrusionsrichtung über die normierte Position auf dem Extrusionsspline (vgl. Abbildung 3–3) definiert ist. An dieser Stelle wird ein lokales Triggerkoordinatensystem erzeugt.

Die Triggermechanismen werden in der vorgestellten Implementierung entweder einer Kante oder einem LINK-Knoten zugeordnet. Ist der Trigger einer Kante zugewiesen, wird ein lokales Koordinatensystem auf der jeweiligen Wand erzeugt. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt dabei auf der Mitte der jeweiligen Wand in Höhe des Querschnitts der normierten Position auf dem Extrusionsspline. Eine Achse zeigt dabei in Extrusionsrichtung (x_{ext}). Die zweite Achse liegt in der Profilquerschnittsebene tangential zur Wand (x_{pro}). Die dritte Achse liegt ebenfalls in der Profilquerschnittsebene und steht normal auf der Wandoberfläche und zeigt in Richtung Profillinenseite (x_n). Handelt es sich hingegen um einen Trigger, der auf einem LINK-Knoten definiert ist, so zeigt der Normalenvektor x_n in Richtung der Winkelhalbierenden der zwei angrenzenden Außenwände. Der Vektor x_{pro} wird in der Folge derart gewählt, dass ein Rechtssystem entsteht. Trigger können nur auf die Außenkanten des Graphen bzw. auf LINK-Knoten, welche Teil der Außenwände sind, aufgebracht werden.

4.3.1 Verprägungen/Sicken

Es werden zwei Arten von Verprägungen implementiert, zum einen Wandverprägungen bzw. Sicken und zum anderen Eckverprägungen. Beide Umsetzungen basieren auf der Verschiebung von FE-Knoten. Da diese Trigger die Geometrie lokal stark verändern und es somit zu Durchdringungen mit anderen Wänden im Querschnitt kommen kann, wird die Fertigbarkeit der Trigger vor der Netzmodifikation graphenbasiert überprüft. Zudem wird für Eckverprägungen überprüft, ob sich am LINK-Knoten, an welchem die Verprägung aufgebracht werden soll, exakt zwei Außenkanten und keine inneren Kanten (vgl. Abschnitt 3.1) befinden. Eine zusätzliche Wand würde eine Fertigung in der Regel signifikant erschweren. Abbildung 4–14 zeigt beide Verprägungsarten schematisch mit ihren spezifischen Parametern.

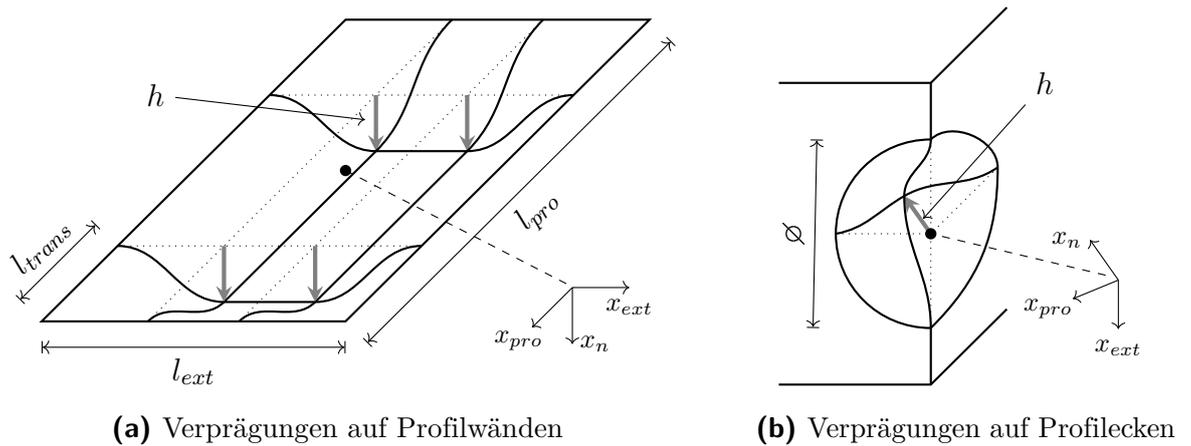


Abbildung 4–14: Schematische Darstellung der Verprägungen; zur besseren Darstellung ist der Ursprung des jeweiligen Koordinatensystems verschoben dargestellt (modifiziert aus (Sperber et al. 2019))

Wandverprägungen

Die implementierten Wandverprägungen sind über die folgenden Eingangsparameter definiert:

- Normierte Position auf Extrusionsspline/-strecke ($0 \leq u \leq 1$)
- Kanten-ID im Graph
- Verprägungstiefe (h)
- Dimensionen in Profil- und Extrusionsrichtung (l_{pro}, l_{ext})
- Dimensionen des Übergangs auf die maximale Verprägungstiefe (l_{trans})

Das Ablaufdiagramm zum Aufbringen von Wandverprägungen ist in Abbildung 4–15 dargestellt. Die geometrische Beschreibung der Wandverprägungen erfolgt über verschiedene Zonen. Der mittlere Bereich der Verprägung (bzw. der Boden) verfügt über die maximale Verprägungstiefe

$$h_{mid} = h. \quad (4-8)$$

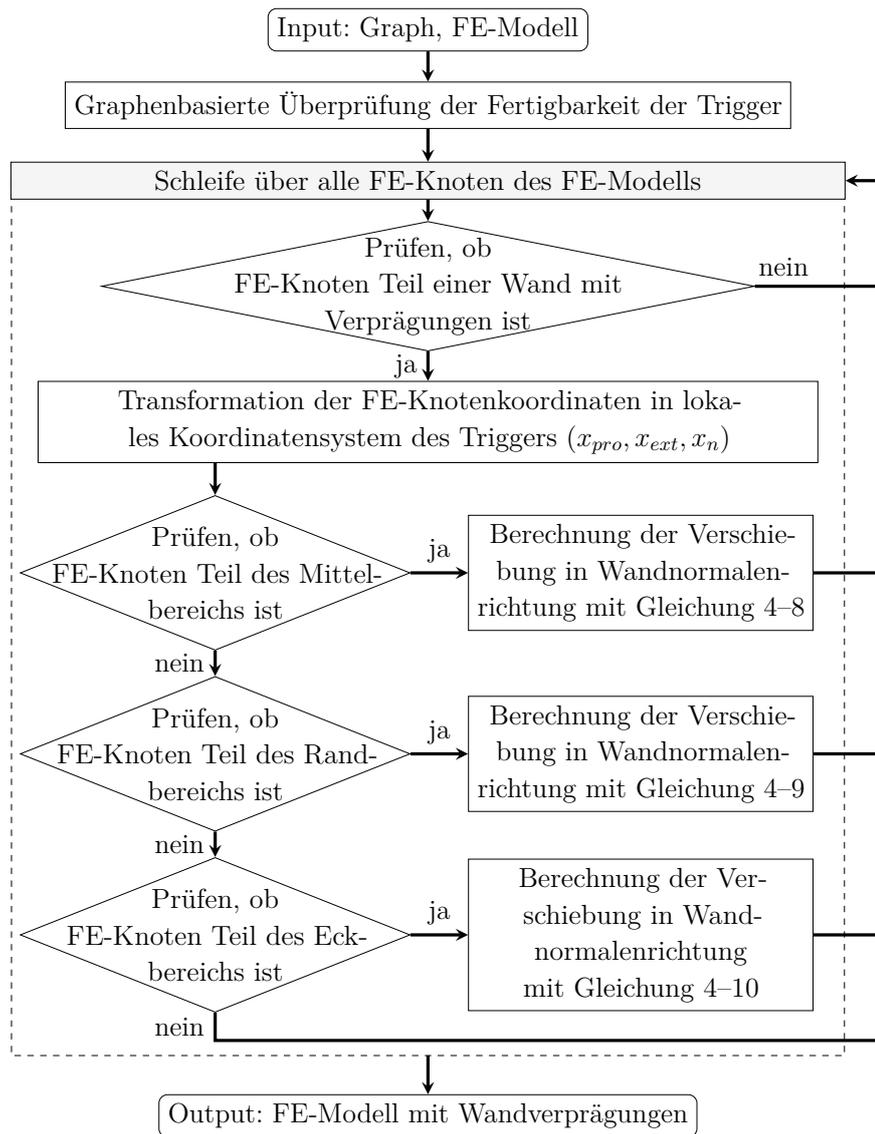


Abbildung 4–15: Ablaufdiagramm zum Aufbringen von Wandverprägungen auf das FE-Modell

Die Beschreibung des Übergangsbereichs zwischen dem Boden und den umliegenden Wänden erfolgt mittels trigonometrischer Funktionen

$$h_{trans}(x_{pos}) = h \frac{\cos\left(\frac{\pi}{l_{trans}} x_{pos}\right) + 1}{2} \quad (4-9)$$

mit

$$x_{pos,pro} = |x_{pro}| - \frac{l_{pro}}{2} - l_{trans} ,$$

$$x_{pos,ext} = |x_{ext}| - \frac{l_{ext}}{2} - l_{trans} ,$$

wobei für x_{pro} und x_{ext} die entsprechenden Koordinatenwerte der jeweiligen Achse im Triggerkoordinatensystem einzusetzen sind. In den Eckbereichen überlagern sich die trigonometrischen Funktionen der Verprägungstiefe zu

$$h_{cor}(x_{pos,pro}, x_{pos,ext}) = h \frac{\cos(\frac{\pi}{l_{trans}} x_{pos,pro}) + 1}{2} \frac{\cos(\frac{\pi}{l_{trans}} x_{pos,ext}) + 1}{2}. \quad (4-10)$$

Für eine verbesserte Diskretisierung der Eckbereiche (vgl. Abbildung 4-14) erfolgt eine partielle Neuvernetzung mit Dreieckselementen.

Eckverprägungen

Das Aufbringen der Eckverprägungen erfolgt über FE-Knotenverschiebungen. Die geometrische Beschreibung erfolgt dabei durch die Überlagerung von trigonometrischen Funktionen und Polynomen vierter Ordnung, um einen glatten Verlauf zu erreichen. Die Eckverprägungen sind über folgende Eingangsparameter definiert:

- Normierte Position auf Extrusionsspline/-strecke ($0 \leq u \leq 1$)
- LINK-Knoten-ID im Graphen
- Verprägungsdurchmesser \varnothing
- Verprägungstiefe h

4.3.2 Ausschnitte

Ausschnitte werden als einfache Element- und FE-Knotenlöschungen implementiert (vgl. Abbildung 4-13). Somit kann auf komplexe Netzmodifikations- und Neuvernetzungsalgorithmen verzichtet werden. Die Definition von Ausschnitten ist auf Kanten und LINK-Knoten über die folgenden Eingangsparameter möglich:

- Normierte Position auf Extrusionsspline/-strecke ($0 \leq u \leq 1$)
- Typ des Ausschnitts (Ausschnitt auf Kante oder LINK-Knoten)
- Element-ID im Graphen
- Dimensionen in Profil- und Extrusionsrichtung

4.3.3 Anfasungen

Anfasungen werden als kombinierte FE-Knotenverschiebung und Modifikation der Wanddicke in GRAMB implementiert. Dabei können zwei verschiedene Arten von Anfasungen definiert werden. Wird als normierte Position des Triggers auf dem Extrusions spline der Wert 0 oder 1 gewählt, handelt es sich um eine Anfasung am Profilende (vgl. Abbildung 4–16 (a)). Für Werte zwischen 0 und 1 erfolgt eine Anfasung wie in Abbildung 4–16 (b). Die FE-Knoten werden dabei jeweils auf die neue Mittelfläche der Wand verschoben, während die Elementdicke entsprechend der Wanddicke an dieser Stelle angepasst wird.

Eine Anfasung wird über die folgenden Parameter definiert:

- Position auf Extrusionsspline/-strecke ($0 \leq u \leq 1$)
- Kanten-ID im Graphen
- Anzahl der einbezogenen FE-Knotenreihen
- Dimensionen in Profil- und Extrusionsrichtung
- Relative Tiefe der Anfasung ($0 < h_{rel} < 1$)

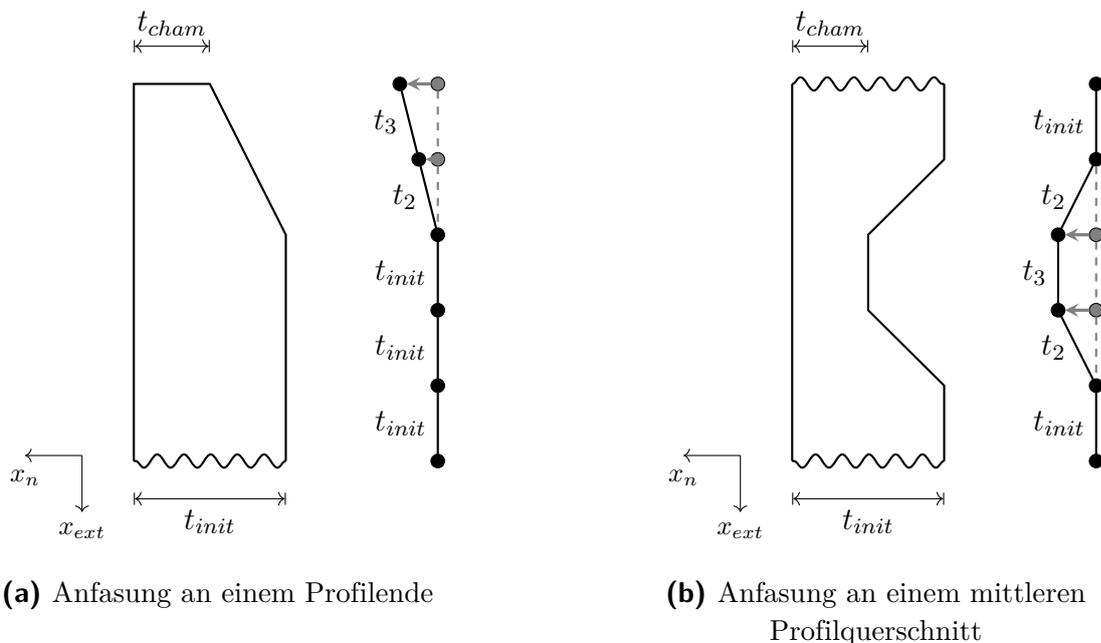


Abbildung 4–16: Schematische Darstellung der Anfasungen (links jeweils ein Schnitt durch die reale Wand, rechts der Schnitt durch das FE-Modell mit Schalenelementen)

Die Tiefe der Anfasung wird dabei relativ zur Dicke der jeweils angefasten Wand definiert. Für die resultierende Wanddicke gilt:

$$t_{cham} = (1 - h_{rel}) t_{init}. \quad (4-11)$$

4.3.4 Erweiterung der Graphensyntax

Zur Nutzung der zuvor aufgezeigten Triggermechanismen im Optimierungsprozess der GHT (z.B. zur automatisierten Aufbringung durch Heuristiken oder zur Nutzung der Triggerparameter als Entwurfsvariablen in der inneren Optimierungsschleife) müssen diese in die Graphensyntax integriert werden. Aus diesem Grund wird ein neuer TRIGGER-Knoten geschaffen. Dieser Knoten ist optional und besitzt in der visuellen Darstellung der Graphen in dieser Arbeit keine Repräsentation (im Gegensatz zu den LINK-Knoten und den Kanten).

Verprägungen

```
VERTEX, TRIGGER, 3, INDENT, VERTICES(1,3), POSITION(0.8), DIMENSIONS(15), DEPTH(3.5)
VERTEX, TRIGGER, 4, INDENT, EDGES(2), POSITION(0.5), DIMENSIONS(60,20,10), DEPTH(3.5)
```

Ausschnitte

```
VERTEX, TRIGGER, 5, CUTOUT, VERTICES(1), POSITION(0.7), DIMENSIONS(6,6)
VERTEX, TRIGGER, 6, CUTOUT, EDGES(1,3), POSITION(0.7), DIMENSIONS(12,10)
```

Anfasungen

```
VERTEX, TRIGGER, 1, CHAMFER, EDGES(2,4), POSITION(1.), ROWS(2), RELATIVEDEPTH(0.5)
VERTEX, TRIGGER, 2, CHAMFER, EDGES(1,3), POSITION(0.5), ROWS(2), RELATIVEDEPTH(0.5)
```

Abbildung 4–17: Beispiele für Trigger in der Graphensyntax

Ein TRIGGER-Knoten beginnt immer mit einer spezifischen Syntax (VERTEX, TRIGGER,) sowie der Knoten-ID als natürliche Zahl. Anschließend folgen die Art des Triggers (INDENT (Verprägung), CUTOUT (Ausschnitt), CHAMFER (Anfasung)) sowie die jeweiligen Graphenelemente (VERTICES oder EDGES) für eine spezifische Definition der Triggerart. An dieser Stelle werden zudem die relevanten Graphenelement-IDs, auf die der Trigger aufgebracht werden soll, aufgeführt. Folglich kann ein einzelner Trigger für mehrere LINK-Knoten oder Kanten definiert werden. Weiterhin werden alle Triggermechanismen in der Syntax durch ihre normierte Position (POSITION) auf dem Extrusionsspline beschrieben. Parameter zur genauen Formbeschreibung bzw. zur geometrischen Definition der Triggermechanismen sind für jede Triggerart spezifisch zu definieren. Beispiele für die Definition der verschiedenen Triggermechanismen sind in Abbildung 4–17 aufgezeigt.

5 Heuristiken zur Optimierung axial belasteter Crashstrukturen

Für die effiziente Anwendung der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Optimierung axial belasteter Crashstrukturen ist die Entwicklung neuer, spezifischer Heuristiken essenziell. Die existierenden Heuristiken (vgl. Abschnitt 3.2) sind mit dem primären Ziel entwickelt worden, die Struktureigenschaften lateral crashbelasteter Profilstrukturen, welche die Stoßenergie mittels lateraler Kompression und/oder Biegung dissipieren, zu verbessern. Im Gegensatz dazu wird bei axial belasteten Crashstrukturen meist eine Energieabsorption mittels Faltenbeulen angestrebt. In dieser Arbeit werden unter dem Begriff der *lateralen Heuristiken* jene Heuristiken verstanden, welche im Wesentlichen zur Optimierung von lateral gestauchten oder biegebelasteten Profilstrukturen entwickelt wurden (vgl. Abschnitt 3.2). Als *axiale Heuristiken* werden die in diesem Kapitel neu vorgestellten Heuristiken bezeichnet.

Aufgrund dieser Unterschiede beim angestrebten Deformationsverhalten, führen unterschiedliche Querschnittstopologien zu optimalen Ergebnissen hinsichtlich typischer Zielfunktionen (z.B. der spezifischen Energieabsorption). Während bei lateral belasteten Crashstrukturen das Aufbauen von Lastpfaden zwischen verschiedenen Bereichen des Querschnitts bedeutend für ein effizientes Ausnutzen der Struktur ist und kleine Kammern hierbei tendenziell eher hinderlich sind (Ortmann 2015), zeigt sich bei axial belasteten Profilstrukturen ein umgekehrter Zusammenhang. Kleine Kammern bzw. kurze Wände im Querschnitt mit vielen Kreuzungspunkten führen häufig zu einem besseren spezifischen Energieabsorptionsvermögen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Hinzu kommt, dass bei axial belasteten Strukturen Euler-ähnliche Knickformen und insbesondere globale Biegung (vgl. Abschnitt 2.2.1) eine zusätzliche Herausforderung darstellen, welcher in einer Optimierung begegnet werden sollte. Ebenso ist für ein robustes Initiieren und Aufrechterhalten von Faltenbeulen die Verwendung von Triggermechanismen Stand der Technik in der Automobilindustrie (vgl. Abschnitt 2.2.3) und sollte daher ebenfalls bei der Entwicklung neuer Heuristiken berücksichtigt werden.

Neben diesen Unterschieden existieren jedoch Gemeinsamkeiten zwischen den beiden Anwendungsfällen. Unregelmäßige Strukturen führen beispielsweise tendenziell zu gleichmäßigeren Kraft-Weg-Verläufen (vgl. (Ortmann 2015) sowie das Ingenieurprojekt von Dominik Schneider (Anhang A)). Zudem können Wände, welche im Vergleich zum Rest der Struktur besonders starkes Beulen oder Materialversagen zeigen, zu einer reduzierten Stabilität bzw. Integrität der Struktur führen.

Methodiken zur Vereinfachung der Querschnittstopologie sind nicht immer aus Sicht der Energieabsorption sinnvoll. Unter Umständen können sie jedoch die Stabilität der Struktur verbessern, indem die Steifigkeit bestimmter Bereiche reduziert wird. Zudem verbessern sie die Anwendbarkeit der anderen Heuristiken und können zu Vorteilen hinsichtlich der Fertigbarkeit führen. Neben einer Verbesserung der Struktureigenschaften aufgrund des gleichen Wirkprinzips ist es weiter möglich, dass eine Heuristik, welche für die Anwendung bei lateralen Strukturen mit einem bestimmten mechanischen Ziel entwickelt wurde, bei axialen Strukturen ebenfalls zu einer Verbesserung führen kann, jedoch auf Basis eines anderen Wirkprinzips.

Aus dieser Aufstellung wird ersichtlich, dass sich klare Zusammenhänge zwischen den mechanischen Wirkprinzipien der einzelnen Heuristiken und den Auswirkungen auf die Strukturantworten nur für spezielle Fälle klar ableiten lassen. Dabei verfolgen die Heuristiken oftmals gegensätzliche bzw. konkurrierende Ziele. Dies spiegelt die Zielkonflikte bei der Auslegung von Crashstrukturen wider (vgl. Abschnitt 2.1). Aus Sicht der Methodik führt das Konkurrieren der Heuristiken folglich jedoch zu einer besseren Entwurfsraumabtastung und im Spannungsfeld der verschiedenen Auslegungsziele und Restriktionen zu besseren Ergebnissen.

Im Folgenden werden zunächst die Anwendung sowie mögliche Modifikationen der lateralen Heuristiken für die Optimierung axial belasteter Crashstrukturen diskutiert. Anschließend erfolgt die Vorstellung der für die Optimierung von axialen Crashstrukturen entwickelten Heuristiken. Das Vorgehen bei der Ideengenerierung ist angelehnt an (Ortmann 2015). Neben Workshops und Diskussionen mit Entwicklungsingenieuren aus dem Bereich der Strukturauslegung und der passiven Fahrzeugsicherheit werden zudem etablierte Ansätze aus der Literatur verfolgt. Die daraus abgeleiteten Heuristiken werden in zwei wesentliche Kategorien unterteilt: Zum einen Heuristiken zur Verbesserung der Energieabsorptionseigenschaften und zum anderen Heuristiken, welche das Ziel haben die Initiierung und das Aufrechterhalten von Faltenbeulen zu verbessern.

5.1 Anwendung von Heuristiken für lateral belastete Crashstrukturen

5.1.1 Diskussion der Anwendbarkeit

An dieser Stelle wird die Verwendung der lateralen Heuristiken für die Optimierung von axial belasteten Crashstrukturen diskutiert. Tabelle 5–1 fasst wesentliche vorteilhafte und nachteilige Eigenschaften zusammen, wobei ein Herausarbeiten klarer und allgemeingültiger Zusammenhänge aufgrund der Vielzahl von Abhängigkeiten und denkbaren Randbedingungen schwerlich möglich ist. Die folgenden Ausführungen beziehen sich dabei auf die in den Abbildungen 3–4 und 3–5 vorgestellten Heuristiken.

Eine klare Empfehlung für oder gegen die Verwendung der in Tabelle 5–1 diskutierten Heuristiken zur Topologieoptimierung axial belasteter Crashstrukturen lässt sich allein auf Basis theoretischer Betrachtungen nicht aussprechen. Für den Fall, dass sich die mechanische Begründung für die Verwendung einer Heuristik nicht auf axial belastete Crashstrukturen übertragen oder adaptieren lässt, kann diese Heuristik immer noch aus Gründen der besseren Entwurfsraumabtastung oder aufgrund komplexer, nichtlinearer Zusammenhänge (z.B. zum Austarieren von Nachgiebigkeiten und Steifigkeiten) vorteilhaft sein. Daher werden umfangreiche Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit aller Heuristiken in den verschiedenen axialen Anwendungsfällen durchgeführt.

Aus der Diskussion der bestehenden Heuristiken lassen sich Ideen und Ansätze für neue Heuristiken ableiten. Die Heuristik *Balance Energy Density* (BED) versucht beispielsweise Wände mit möglichst großem Unterschied in der inneren Energiedichte zu verbinden, um somit einen Ausgleich der inneren Energiedichte zu erreichen. Für axial belastete Strukturen scheint dieser Ansatz weniger Erfolg versprechend, da sich Lastpfade innerhalb des Profilquerschnitts beim Faltenbeulen schwerer aufbauen und sich somit die innere Energiedichte ebenfalls schwerer ausgleichen lässt. Deshalb wird später eine Heuristik vorgestellt, die den Analyseansatz von BED zur Identifikation der Wände mit der geringsten inneren Energiedichte aufgreift und darauf basierend versucht, die spezifische Energieabsorption dieser Wände zu erhöhen.

Neben der Ableitung neuer Heuristiken wird im folgenden Abschnitt die Heuristik *Use Deformation Space Tension/Compression* weiterentwickelt. Der bisherige Ansatz zur Analyse der Crash-Ergebnisdaten lässt sich, aufgrund der Verwendung

Tabelle 5–1: Diskussion der lateralen Heuristiken bezüglich ihrer Anwendung für axial belastete Crashstrukturen

Heuristik	Tendenziell vorteilhaft	Tendenziell nachteilig
Delete Needless Wall (DNW)	Unbelastete Wände sind bei axial belasten Strukturen ebenfalls nachteilig, insbesondere für die spezifischen Energieabsorptionseigenschaften.	Wie bei den lateral belasteten Strukturen ist es jedoch möglich, dass sie weitere Wände abstützen und dadurch erst deren hohe Energieaufnahme ermöglichen.
Support Buckling Walls (SBW)	Das Abstützen von Wänden mit großen Falten führt zu kleineren Faltenbeulwellenlängen und damit üblicherweise zu einem besseren Energieabsorptionsvermögen.	Homogenes Faltenbeulen muss nicht in jedem Fall vorteilhaft für eine gleichmäßige Kraft-Weg-Kurve und ein hohes Energieabsorptionsvermögen sein.
Balance Energy Density (BED)	Das Aufteilen einer Wand, welche eine geringe Energiedichte hat, ist oft vorteilhaft hinsichtlich des Energieabsorptionsvermögens.	Durch das Verbinden von Wänden mit hoher und niedriger innerer Energiedichte wird die Belastung bei axial belasteten Strukturen üblicherweise nicht von einer zur anderen Wand geleitet.
Use Deformation Space (UDS)	Ein Ausnutzen des auftretenden Deformationsraums bleibt bei axial belasteten Strukturen erstrebenswert.	Aufgrund der in Extrusionsrichtung voranschreitenden Deformation ist die Verwendung einer einzigen, vordefinierten Analyseebene nicht zielführend.
Remove Small Chambers (RSC)	Das Bereinigen der Querschnittstopologie und Reduzieren der Steifigkeit bleiben eine notwendige Maßnahme.	Kleine Kammern haben bei axial belasteten Strukturen in der Regel gute Energieabsorptionseigenschaften.
Support Collapsing Walls (SCW)	Strukturelle Integrität ist bei axial belasteten Strukturen ein wichtiges Auslegungskriterium. Zudem kann durch Faltenbeulen mehr Energie absorbiert werden als bei einem Versagen der Struktur.	
Create Lattice Structures (CLS)	Gitterstrukturen sind übliche und effiziente Querschnittstopologien bei axial belasteten Crashstrukturen (vgl. Abschnitt 2.2.2).	Aus der Literatur sind effizientere Querschnittstopologien bekannt.
Use Center of Gravity (UCG)	Das Ausnutzen eines Lastpfades durch den Profilschwerpunkt könnte gegen globale Biegung hilfreich sein.	Der Nutzen ist aber geringer als bei lateral belasteten Strukturen, da die Belastung meist nicht von der einen Seite der Struktur zur anderen weitergeleitet werden kann.

einer einzigen vordefinierten Querschnittsebene zur Analyse des Deformationsverhaltens (Analyseebene), nicht auf axiale Crashstrukturen übertragen. Zudem besitzt dieser Ansatz auch bei der Analyse von lateralen Profilstrukturen Nachteile.

Die Heuristiken zur Formänderung (*Smooth Structure*) und Dimensionierung (*Scale Wall Thicknesses*) sind in Tabelle 5–1 nicht aufgeführt. Der Einsatz der Heuristik *Scale Wall Thicknesses* ist im Hinblick auf den Optimierungsablauf jedoch weiterhin substantiell. Der positive Effekt dieser Heuristik, Änderungen der Strukturmasse, welche durch das Hinzufügen oder Entfernen von Wänden im Querschnitt auftreten, zu kompensieren, bleibt auch bei einer Änderung der Belastungsrichtung bestehen. Gegen den Einsatz der Heuristik *Smooth Structure* spricht die Tendenz, dass zusätzliche Ecken im Profilquerschnitt zu einer Erhöhung der spezifischen Energieabsorption führen. Der Vorteil dieser Heuristik liegt jedoch darin, dass sie den Graphen vereinfacht. Die Heuristiken zur Topologieänderung können folglich effizienter mit diesem Graphen arbeiten. Zudem reduziert diese Heuristik die Anzahl der möglichen Entwurfsvariablen einer potenziell nachfolgenden Formoptimierung und trägt somit zu einer Verbesserung der Effizienz der Methode bei. Aus diesen Gründen wird die Heuristik auch bei der Optimierung axial belasteter Crashstrukturen verwendet.

5.1.2 Weiterentwicklung der Heuristik Use Deformation Space

Die Heuristiken *Use Deformation Space Tension* und *Use Deformation Space Compression* (vgl. (Ortmann et al. 2021) bzw. Abschnitt 3.2) analysieren relative Verschiebungen von FE-Knoten in einem durch den Anwender vor der Optimierung definierten Querschnitt des Profils. Anschließend versuchen sie Wände miteinander zu verbinden, welche sich vergleichsweise stark voneinander weg- bzw. aufeinander zubewegen. Ziel ist es den zur Verfügung stehenden Deformationsraum effektiv zu nutzen. Erfahrungen bei der Anwendung dieser Heuristiken für lateral belastete Crashstrukturen zeigen, dass die dabei vorgeschlagenen Entwürfe oft zu einer Verbesserung der Zielfunktionen oder zu einer Verringerung der Restriktionsverletzungen führen (vgl. (Ortmann 2015)).

Für axial faltende Profilstrukturen kann die Idee des Ausnutzens von Deformationsräumen weiterverfolgt werden. Zum einen werden Wände, welche große aufeinander zu- oder voneinander wegbewegende Falten zeigen, miteinander verbunden. Somit wird der zur Verfügung stehende Deformationsraum effizienter (z.B. durch eine kleinere Faltenbeulwellenlänge) genutzt. Zum anderen können stark aufeinander zu-

oder voneinander wegbewegende Wände lokale Instabilitäten induzieren, welche zu einem Knick- oder Biegekollaps der Struktur führen können. Die Heuristik versucht diesem entgegenzuwirken.

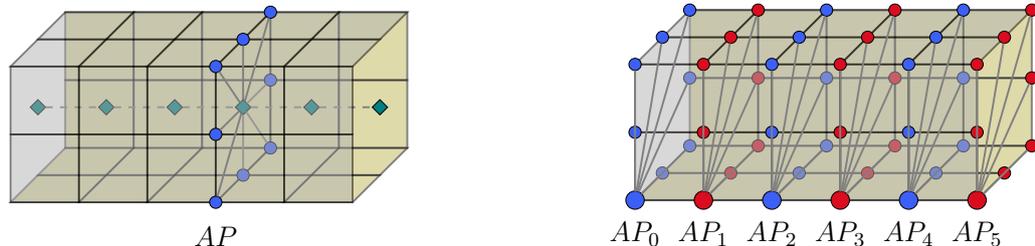
Als nachteilig an dem bisherigen Prinzip der Heuristik ist anzusehen, dass die Analyseebene vor dem Start der Optimierung durch den Anwender definiert werden muss. Bei unterschiedlichen Lastfällen in einer Optimierung (z.B. verschiedene Trefferlagen eines Pfahls auf den Schweller) führt das zu einem Konflikt, an welcher Stelle die Analyseebene idealerweise platziert werden soll. Bei der Optimierung von Profilstrukturen unter axialer Crashbelastung kommt hinzu, dass sich die Deformation in Richtung der Profillängsachse fortsetzt und somit eine Vielzahl von Profilquerschnitten betrifft. Außerdem lässt sich der Ort der ersten Deformation nicht in allen Fällen vorhersagen.

Das Ziel ist daher, den Ablauf der Heuristik derart weiterzuentwickeln, dass ihr etabliertes (mechanisches) Prinzip erhalten bleibt. Zusätzlich soll die Heuristik für mehrere Lastfälle und für Faltenbeulen effizient das Deformationsverhalten erkennen und basierend darauf Topologiemodifikationen vorschlagen. Hierfür können zwei alternative Ansätze identifiziert werden. Der erste Ansatz ist die Beibehaltung der Auswertung der relativen Verschiebungen innerhalb von Querschnitten mit einer automatisierten Detektion der jeweils relevantesten Analyseebene. Alternativ kann der bisherige Ansatz der zweidimensionalen Querschnittsbetrachtung zu einem dreidimensionalen Analyseansatz erweitert werden. Dabei werden für die Auswertung der relativen Verschiebungen die FE-Knotenpositionen aller FE-Knoten des Profils und nicht nur die der jeweiligen Analyseebene mit einbezogen.

Das Verfolgen des dreidimensionalen Ansatzes beinhaltet die Herausforderung der Berechnung und Auswertung einer extremen Anzahl möglicher FE-Knotenpaar-Kombinationen (Die Anzahl der notwendigen Auswertungen beträgt $\approx \frac{1}{2}N^2$, wobei N der Anzahl der FE-Knoten des Profils entspricht). Zudem wäre eine Vorauswahl für das Sortieren der ausgewerteten Kombinationen notwendig. Weiter ist zu hinterfragen, ob die aktuelle Metrik für die Berechnung der normierten Relativverschiebungen (vgl. Gleichungen 5-1 und 5-2) weiterhin mit der gleichen Effektivität hinsichtlich der Ermittlung des größten Deformationsraums angewendet werden kann.

Aus diesem Grund wird der Ansatz der automatischen Detektion der Analyseebenen und die anschließende Bestimmung der relevantesten Analyseebene für jeden Lastfall gewählt. Für die Optimierung einer lateral belasteten Struktur mit einem einzigen Lastfall (z.B. Pfahl, der auf Schweller an definierter Position auftrifft) wird hierbei in der Regel der Querschnitt detektiert, welcher beim bisherigen

Ansatz üblicherweise vom Anwender vor der Optimierung gewählt worden wäre (z.B. die Position des Pfahls). Für eine Optimierung mit mehreren lateralen oder axialen Lastfällen wird für jeden Lastfall individuell der relevanteste Querschnitt detektiert.



(a) Bisher: Durch den Anwender vorgegebene Analyseebene (AP), welche über eine FE-Knotengruppe im FE-Modell definiert wird

(b) Neu: Automatische Detektion aller Analyseebenen aus dem FE-Modell

Abbildung 5–1: Vergleich der bisherigen und neuen Implementierung der Analyseebenen in den Heuristiken *Use Deformation Space Compression* und *Use Deformation Space Tension* (Darstellung nimmt Bezug auf Abbildung 3–3)

Abbildung 5–1 zeigt schematisch den bisherigen Ansatz (a) sowie die neue, automatisierte Detektion der Analyseebenen auf Basis der FE-Modelldaten (b). Die automatische Detektion der Analyseebenen erfolgt unter der Annahme einer äußerstenfalls moderat in Längsrichtung gebogenen Profilstruktur. Zunächst werden hierfür alle FE-Knoten ermittelt, welche mindestens zu zwei verschiedenen Wänden gehören und welche sich folglich an einem Wandknoten im Profilquerschnitt befinden. Somit kann für jeden LINK-Knoten eine Gruppe an FE-Knoten (in diesem Abschnitt *Spurknoten* genannt) bestimmt werden, welche den Verlauf der Struktur in Längs- bzw. Extrusionsrichtung beschreibt.

Für die Extraktion der Analyseebenen ist die Reihenfolge der Spurknoten unbedeutend. Es folgt die Auswahl der Gruppe mit der größten Anzahl an Spurknoten, um eine bestmögliche Repräsentation zu erreichen. Mittels einer Schleife über alle FE-Knoten der Profilstruktur wird jeder FE-Knoten der Struktur demjenigen Spurknoten aus der zuvor bestimmten Gruppe an FE-Knoten zugeordnet, welcher den geringsten euklidischen Abstand besitzt (1:n-Beziehung). Jede dadurch ermittelte FE-Knotengruppe stellt somit die FE-Knoten einer Analyseebene dar. Der Ablauf ist in Abbildung 5–2 im Bereich *Detektion der Analyseebenen* als Flussdiagramm dargestellt.

Im Anschluss an die Detektion der Analyseebenen erfolgt die Auswahl der relevantesten Analyseebene. Hierfür werden die maximalen normierten Relativver-

schiebungen für jede mögliche FE-Knotenpaar-Kombination in der relevantesten Analyseebene aus allen Lastfällen und Zeitschritten berechnet (vgl. Gleichungen 5–1 und 5–2 (Ortmann et al. 2021)). Als zielführend hat sich die Wahl der Analyseebene mit dem größten Mittelwert für die maximalen normierten Relativverschiebungen der FE-Knotenpaare dieser Ebene erwiesen. Der alternative Ansatz, welcher die relevanteste Analyseebene basierend auf dem größten auftretenden Wert für die maximalen normierten Relativverschiebungen der jeweiligen Analyseebenen bestimmt, ist im Vergleich zur gewählten Metrik bedeutend anfälliger hinsichtlich lokaler Ausreißer.

$$\Delta d_{rel,n,m,t} = \frac{d_{n,m,t} - d_{n,m,t_0}}{(d_{n,m,t_0})^s} \quad (\text{UDST}) \quad (5-1)$$

$$\Delta d_{rel,n,m,t} = \frac{d_{n,m,t_0} - d_{n,m,t}}{(d_{n,m,t_0})^s} \quad (\text{UDSC}) \quad (5-2)$$

mit

$\Delta d_{rel,n,m,t}$ normierte Relativverschiebungen

n, m Indizes für zwei FE-Knoten innerhalb einer Ebene

t_0, t Startzeit, Zeitpunkt mit größter Relativverschiebung

$s = 0.5$ Faktor für Kontrolle des Entfernungseinflusses

Nach der Auswahl einer Analyseebene folgt die Heuristik dem Ablauf aus (Ortmann et al. 2021). Zunächst werden die FE-Knotenpaare absteigend nach ihrem Wert für die maximale normierte Relativverschiebung sortiert. Anschließend folgt eine Schleife über die sortierten Knotenpaare. Dabei ordnet die Heuristik den Knotenpaaren die entsprechenden Positionen auf dem Graphen zu und versucht diese mit einer neuen Kante zu verbinden. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis ein Entwurf gefunden wurde, welcher die Fertigungsrestriktionen erfüllt. Der entsprechende Ablauf ist in Abbildung 5–2 dargestellt.

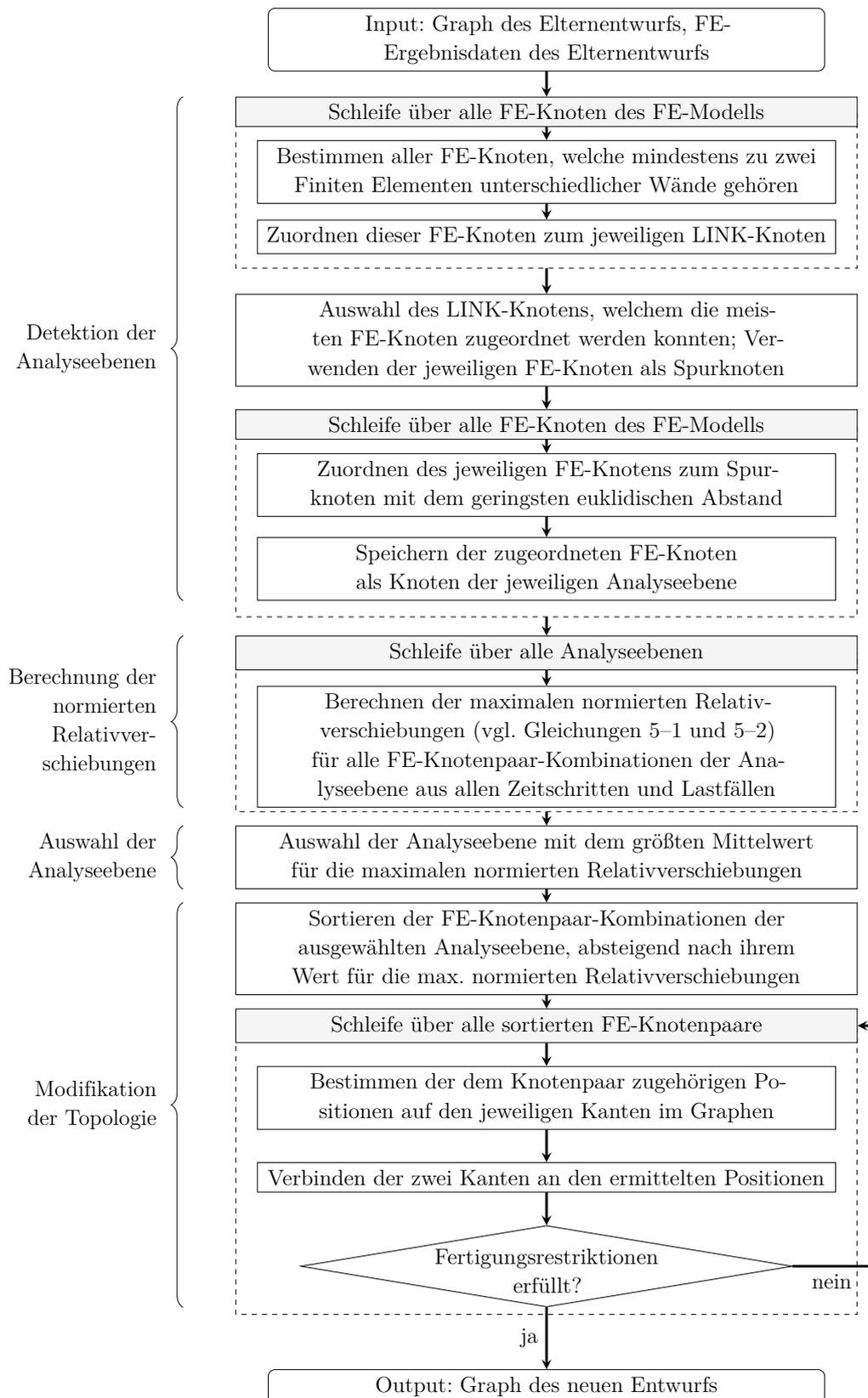


Abbildung 5–2: Ablaufdiagramm der Heuristiken *Use Deformation Space Compression* und *Use Deformation Space Tension*

5.2 Heuristiken zur Verbesserung der Energieabsorptionseigenschaften

In Abschnitt 2.2 wurden verschiedene Kennwerte zur Beschreibung der Energieabsorptionseigenschaften von axial belasteten Profilstrukturen vorgestellt. Dazu zählt die spezifische Energieabsorption (*SEA*), welche die umgewandelte Energie ins Verhältnis zur Masse der Struktur setzt. Zudem finden Kennzahlen wie der *CFE*-Wert, welcher die mittlere Kraft ins Verhältnis zur Maximalkraft setzt und folglich ein Indikator für die Gleichmäßigkeit der Energieabsorption ist, Anwendung. Im Folgenden werden neue Heuristiken vorgestellt, welche das Ziel haben, diese und ähnliche Eigenschaften zu verbessern.

5.2.1 Modifikation der Außengeometrie

Das Modifizieren der Außengeometrie der Profilstruktur stellt keine topologische Modifikation dar. Aus der Literatur (vgl. Abschnitt 2.2) ist bekannt, dass die Außengeometrie einen signifikanten Einfluss auf die Energieabsorptionseigenschaften hat. Die Form der Außengeometrie (z.B. gekrümmte Wände) können spezielle Deformationsformen (z.B. eine symmetrische Deformationsform) initiieren. Zusätzliche Kanten hingegen wirken als Versteifung und können die Faltenbeulwellenlänge (vgl. Abschnitt 2.2.1) reduzieren, was ebenfalls die Energieabsorptionseigenschaften positiv beeinflussen kann.

Eine Anpassung der Außengeometrie könnte als heuristikbasierte Formoptimierung in den Ablauf der GHT integriert werden. Abbildung 5–3 zeigt hierfür schematisch mögliche Ansätze zur Modifikation der Graphen. Aus den folgenden Gründen wird jedoch von einer Implementierung dieser Ansätze abgesehen:

- Eine heuristikbasierte Formoptimierung passt aufgrund der zusätzlich benötigten Funktionsaufrufe für jeden Entwurf der äußeren Optimierungsschleife nicht zum aktuellen Ablauf der GHT, welcher auf eine möglichst effiziente Entwurfsraumabtastung abzielt. Zudem wäre eine weitreichende Anpassung des Optimierungsablaufs der GHT (z.B. durch eine zusätzliche dritte Optimierungsschleife) notwendig, da eine heuristikbasierte Formoptimierung nicht in die aktuelle Umsetzung der äußeren und inneren Optimierungsschleife integrierbar ist.
- Für einige Bauteile (z.B. Längsträger) ist die Außengeometrie des Profils üblicherweise aufgrund der notwendigen Kompatibilität zu anderen Bauteilen

hinsichtlich ihrer Form festgelegt. Eine automatisierte Anpassung könnte aufgrund von Anfangsdurchdringungen oder unvollständiger Anbindung an den Rest der Struktur zu ungültigen bzw. nicht weiterverwendbaren Entwürfen führen.

Grundsätzlich erlaubt der Ablauf der GHT jedoch verschiedenste Außengeometrien, sodass diese durch den Anwender auf Basis von Erfahrung und Expertenwissen ausgewählt werden können. Weitere Untersuchungen zum Einfluss der Außengeometrie auf die Struktureigenschaften werden in Abschnitt 6.1 vorgestellt.

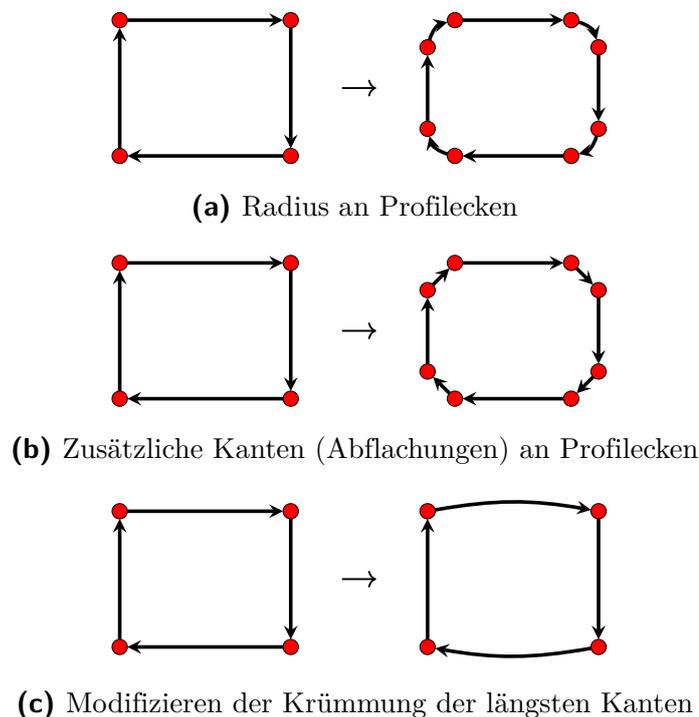


Abbildung 5–3: Schematische Darstellung exemplarischer Modifizierungsmöglichkeiten der Außengeometrie eines Graphen

5.2.2 Connect Low Energy Walls

Aus der Diskussion in Abschnitt 5.1.1 lässt sich ableiten, dass sich der Ansatz der Heuristik *Balance Energy Density*, Wände mit hoher und niedriger innerer Energiedichte zu verbinden, nur bedingt auf axial belastete Crashstrukturen übertragen lässt. Die Heuristik *Connect Low Energy Walls* (CLEW) greift die grundlegende Analyse der inneren Energiedichten auf und versucht im Folgenden jedoch die Kantenkombinationen mit der geringsten addierten inneren Energiedichte zu verbinden. Ziel ist es, die Energieabsorptionseigenschaften dieser Kanten durch das

Reduzieren der Kantenlängen und das Versteifen durch neue Wandknotenpunkte im Profilquerschnitt zu verbessern (vgl. Abschnitt 2.2.2). Abbildung 5–4 zeigt schematisch das Prinzip dieser Heuristik.

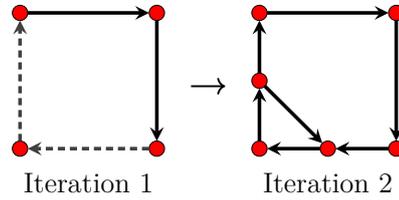


Abbildung 5–4: Schematische Darstellung der Heuristik *Connect Low Energy Walls* (die gestrichelten Kanten repräsentieren die beiden Wände mit der geringsten aufsummierten inneren Energiedichte in einem exemplarischen Lastfall)

Die Berechnung der maximalen mittleren inneren Energiedichte aller Wände in allen Lastfällen \bar{u}_{max} sowie der maximalen normierten und gewichteten inneren Energiedichten jeder Wand \tilde{u}_{max,n_w,n_l} erfolgt dabei analog zur Heuristik *Balance Energy Density* (Ortmann 2015; Ortmann et al. 2021) nach Gleichung 5–3 und Gleichung 5–4. Die Normierung mittels \bar{u}_{max} verfolgt dabei das Ziel, Lastfälle mit höherer mittlerer innerer Energiedichte und folglich größerer plastischer Verformung, stärker zu berücksichtigen. Sie haben häufig eine höhere Relevanz bzw. sind kritischer hinsichtlich gestellter Anforderungen anzusehen. Das Aufsummieren der maximalen normierten und gewichteten inneren Energiedichten $\Sigma \tilde{u}_{max,n_w,m_w}$ erfolgt nach Gleichung 5–5. m_w ist dabei der Index für die zweite Wand der jeweiligen Kombination.

$$\bar{u}_{max} = \max_{\{n_l \in 1, \dots, N_l\}} \left(\frac{1}{N_w} \sum_{n_w=1}^{N_w} \frac{U_{max,n_w,n_l}}{V_{n_w}} \right) \quad (5-3)$$

mit

U_{max,n_w,n_l} maximale innere Energie einer Wand n_w im Lastfall n_l

N_w Anzahl der Wände des Entwurfs

N_l Anzahl der Lastfälle

V_{n_w} Volumen einer Wand n_w

$$\tilde{u}_{max,n_w,n_l} = \frac{U_{max,n_w,n_l}}{V_{n_w} \bar{u}_{max}} \quad (5-4)$$

$$\Sigma \tilde{u}_{max,n_w,m_w} = \sum_{n_l=1}^{N_l} (\tilde{u}_{max,n_w,n_l} + \tilde{u}_{max,m_w,n_l}) \quad (5-5)$$

Die Kantenpaare werden aufsteigend nach ihrer inneren Energiedichte sortiert, sodass Kantenpaare mit einer geringen aufsummierten inneren Energiedichte in der darauffolgenden Schleife zuerst berücksichtigt werden. In dieser Schleife versucht die Heuristik das jeweilige Kantenpaar an den Mittelpunkten der Kanten mit einer neuen Kante zu verbinden. Diese Schleife wird solange durchlaufen, bis ein Entwurf die Fertigungsrestriktionen erfüllt und folglich als Entwurf der Heuristik ausgegeben wird. Das Ablaufdiagramm der Heuristik ist in Abbildung 5-5 dargestellt.

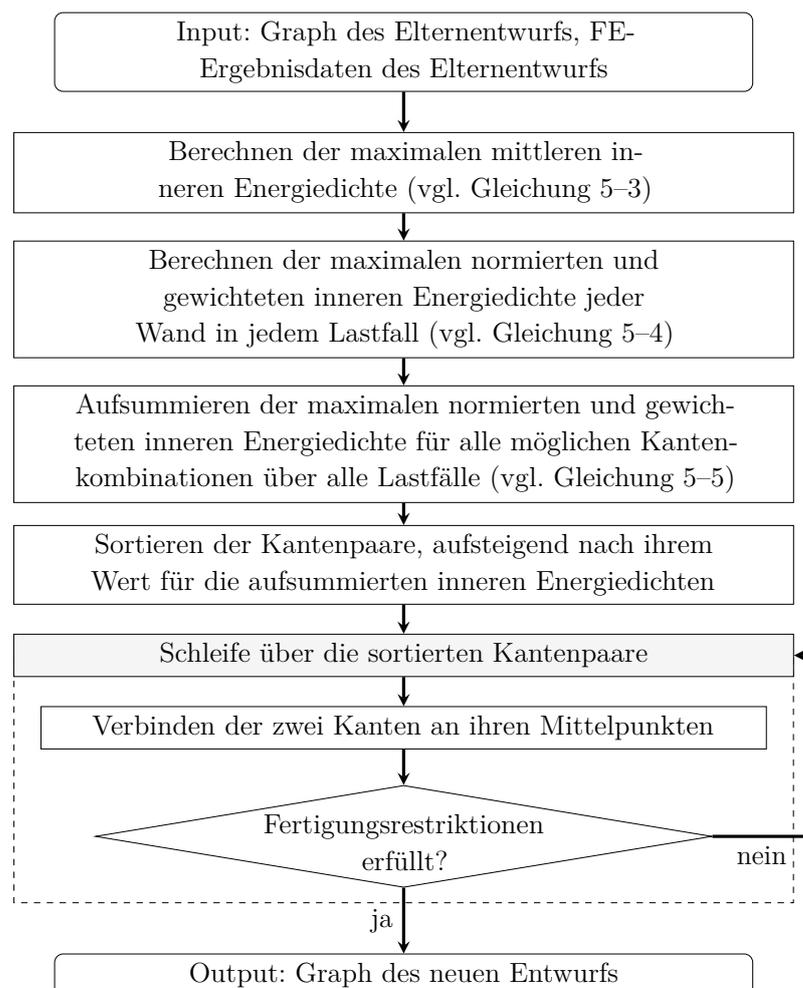


Abbildung 5-5: Ablaufdiagramm der Heuristik *Connect Low Energy Walls*

5.2.3 Split Long Walls

Vergleichsweise lange Wände im Querschnitt von axial belasteten Profilstrukturen tendieren dazu, sich unter Belastung nachgiebiger zu verhalten und beim Faltenbeulen mit einer längeren Beulwellenlänge zu deformieren als vergleichsweise kurze Wände. Folglich absorbieren sie tendenziell weniger Energie. Der Ansatz der Heuristik *Split Long Walls* (SLW, vgl. (Beyer et al. 2021) und Ingenieurprojekt von Dominik Schneider (Anhang A)) beruht daher darauf, lange Wände miteinander zu verbinden und diese folglich aufzuteilen. Durch das Aufteilen können zum einen kürzere Wände mit einer tendenziell geringeren Beulwellenlänge und zum anderen zusätzliche Knotenpunkte im Querschnitt zum Versteifen der Struktur eingebracht werden (vgl. Abschnitt 2.2.2). Ziel dieses Ansatzes ist es die spezifische Energieabsorption der Profilstruktur auf Basis von Analysen der geometrischen Eigenschaften des Querschnitts und daraus abgeleiteten Topologiemodifikationen zu erhöhen. Eine Analyse von Crashsimulationen wird nicht durchgeführt.

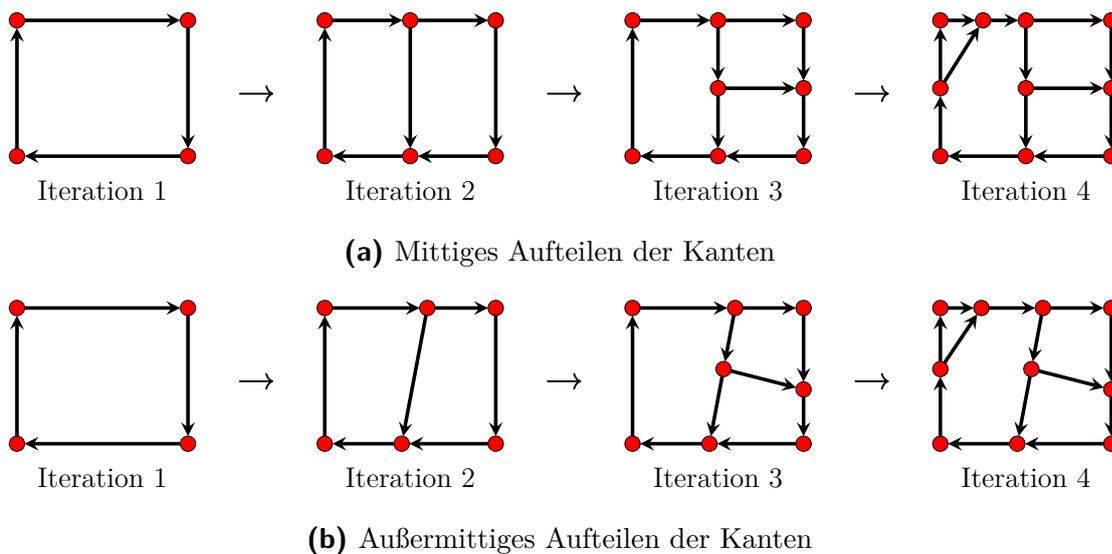


Abbildung 5–6: Schematische Darstellung zweier Implementierungsmöglichkeiten der Heuristik *Split Long Walls* (nur diese Heuristik ist aktiv)

Die Heuristik ermittelt zunächst die jeweils addierten Kantenlängen aller möglichen Kantenpaarungen im Graphen. Anschließend werden diese Kombinationen absteigend nach dem berechneten Wert sortiert. In der Reihenfolge der Sortierung versucht die Heuristik diese Kantenpaarungen mit einer neuen Kante zu verbinden. Das Verbinden kann dabei nach zwei unterschiedlichen Mustern erfolgen. Zum einen können die identifizierten Kanten in ihren Mitten aufgeteilt und verbunden werden. Dieses Vorgehen führt tendenziell zu regelmäßigen Strukturen. Da unregel-

mäßigere Strukturen im Vergleich dazu zu gleichmäßigeren Kraft-Weg-Verläufen führen können (vgl. Ingenieurprojekt von Dominik Schneider (Anhang A)), wird zum anderen ein außermittiges Aufteilungsschema implementiert und als Standardeinstellung der Heuristik gesetzt. Die beiden Ansätze sind in Abbildung 5–6 dargestellt. Das außermittige Aufteilungsmuster hat zudem den Vorteil, dass sich die Vorschläge dieser Heuristik stärker von den Entwürfen der Heuristik *Connect Low Energy Walls* unterscheiden und die Abtastung des Entwurfsraums folglich verbessert wird.

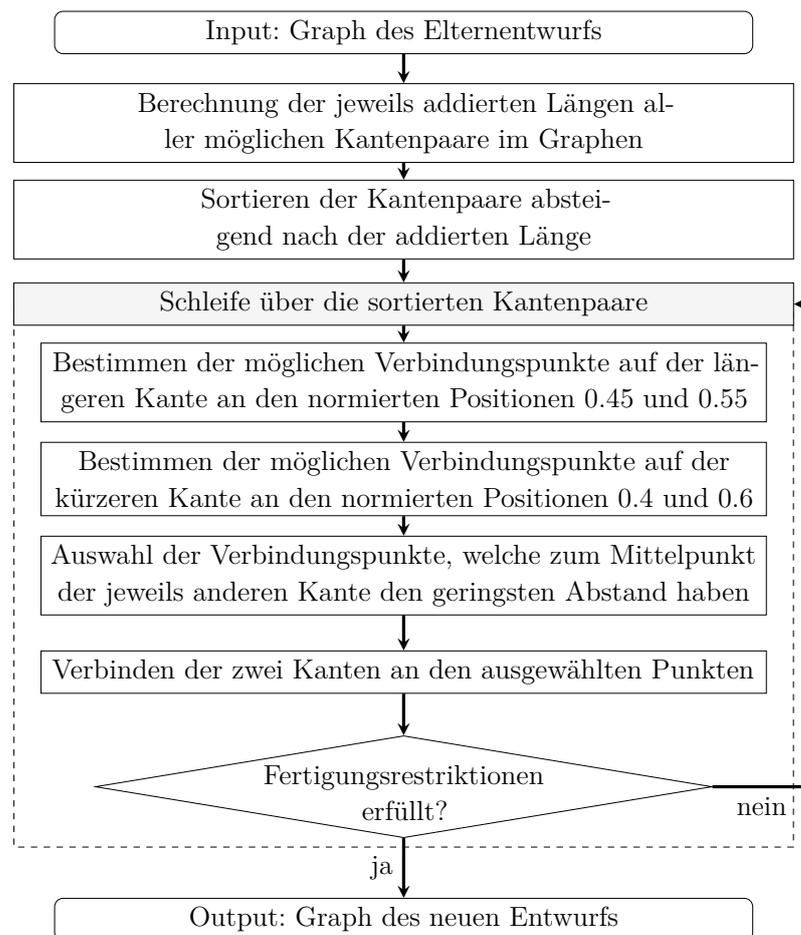


Abbildung 5–7: Ablaufdiagramm der Heuristik *Split Long Walls* mit der Einstellung die Kanten außermittig aufzuteilen (modifiziert aus Ingenieurprojekt von Dominik Schneider (vgl. Anhang A))

Der Ablauf der Heuristik SLW ist in Abbildung 5–7 dargestellt. Die Standardwerte für das Aufteilen der Kanten (lange Kante im Verhältnis 9 zu 11; kurze Kante im Verhältnis 4 zu 6) haben das Ziel eine Balance zwischen einer gewollten Unregelmäßigkeit und einem effektiven Reduzieren der Kantenlängen zu erreichen. Die Werte entstammen dem Ingenieurprojekt von Dominik Schneider (vgl. Anhang A)

und haben sich als zielführend erwiesen. Insgesamt sind durch das außermittige Aufteilen der Kanten vier verschiedene neue Verbindungen der beiden Kanten möglich. Die Heuristik wählt auf jeder Kante denjenigen Punkt als Verbindungspunkt aus, welcher zum Mittelpunkt der anderen Kante den geringsten Abstand hat. Nach dem Verbinden der Kanten wird überprüft, ob der neue Graph die Fertigungsrestriktionen erfüllt. Ist das der Fall, wird die Heuristik beendet. Andernfalls werden in der Schleife weitere Kantenpaare durchlaufen, bis ein fertigbarer Entwurf generiert oder alle Kantenpaare durchlaufen wurden.

5.2.4 Create Different Wall Lengths

Unregelmäßige Querschnittsgeometrien haben die Tendenz gleichmäßigere Kraft-Weg-Verläufe zu erzeugen, da sich verschiedene Faltenbeulwellenlängen überlagern. Das ist dann ein Vorteil für die Energieabsorptionseigenschaften der Struktur, wenn diese Unregelmäßigkeiten die globale Stabilität nicht gefährden oder die Biegeneigung des Profils im vorliegenden Lastfall nicht erhöhen. Ziel der Heuristik *Create Different Wall Lengths* (CDWL, vgl. Ingenieurprojekt von Dominik Schneider (Anhang A)) ist es daher, moderate Unregelmäßigkeiten bei den Wandlängen und Kammergrößen zu erzeugen. Die Heuristik arbeitet dabei rein auf Basis von geometrischen Kriterien der Querschnittsgeometrie. Abbildung 5–8 zeigt die exemplarischen Topologiemodifikationen über mehrere Iterationen für den Fall, dass ausschließlich diese Heuristik aktiv ist.

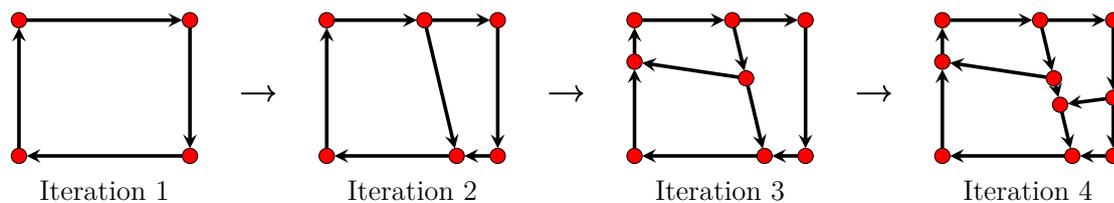


Abbildung 5–8: Schematische Darstellung der Heuristik *Create Different Wall Lengths*

Zur Generierung der Unregelmäßigkeiten greifen verschiedene Parameter und Mechanismen zur Erzeugung unterschiedlicher Wandlängen und Kammergrößen ineinander. Die gewählten Parameter streben dabei wie in Abschnitt 5.2.3 eine Balance zwischen gewollter Unregelmäßigkeit und der Vermeidung extremer Unterschiede in Kantenlängen und Kammergrößen an.

Abbildung 5–9 zeigt das schematische Vorgehen der Heuristik bei einem exemplarischen Graphen. Ausgehend von der längsten Kante im Graphen ermittelt

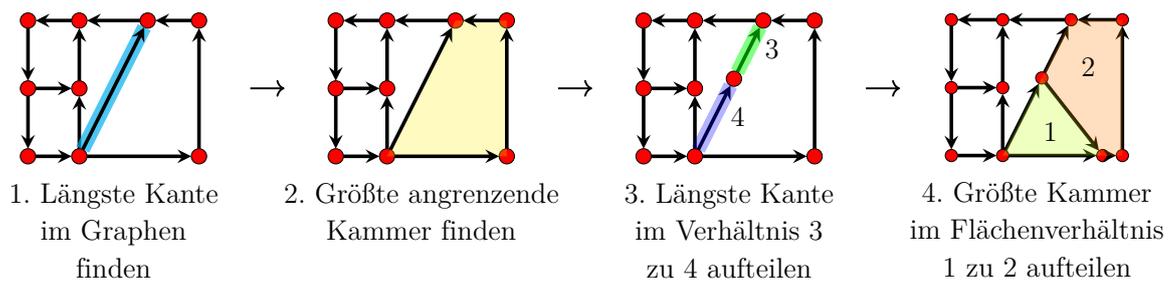


Abbildung 5–9: Schematisches Vorgehen der Heuristik *Create Different Wall Lengths* bei einem exemplarischen Graphen

die Heuristik die flächenmäßig größte an diese Kante angrenzende Kammer. Es erfolgt ein Aufteilen dieser Kante im Verhältnis 3 zu 4. Um lokale Versteifungen zu vermeiden, wird von den beiden möglichen Punkten derjenige priorisiert, der den größten euklidischen Abstand zum nächsten LINK-Knoten hat, welcher nicht Teil dieser Kante ist. Es erfolgt ein Aufteilen der ermittelten Kammer, ausgehend von dem ausgewählten Punkt auf der längsten Kante im Flächenverhältnis 1 zu 2. Für eine weitere Differenzierung der Wandlängen im Querschnitt wird von den beiden möglichen Verbindungspunkten derjenige gewählt, welcher zu einer längeren neuen Kante führen wird. Anschließend wird die neue Kante erzeugt. Zudem wird überprüft, ob der Graph die Fertigungsrestriktionen erfüllt. Ist das der Fall, wird der Entwurf ausgegeben. Für den Fall, dass die Fertigungsrestriktionen verletzt werden, untersucht die Heuristik alternative Entwürfe. Die Werte entstammen dem Ingenieurprojekt von Dominik Schneider (vgl. Anhang A) und haben sich als zielführend erwiesen. Das Ablaufdiagramm der Heuristik ist in Abbildung 5–10 dargestellt.

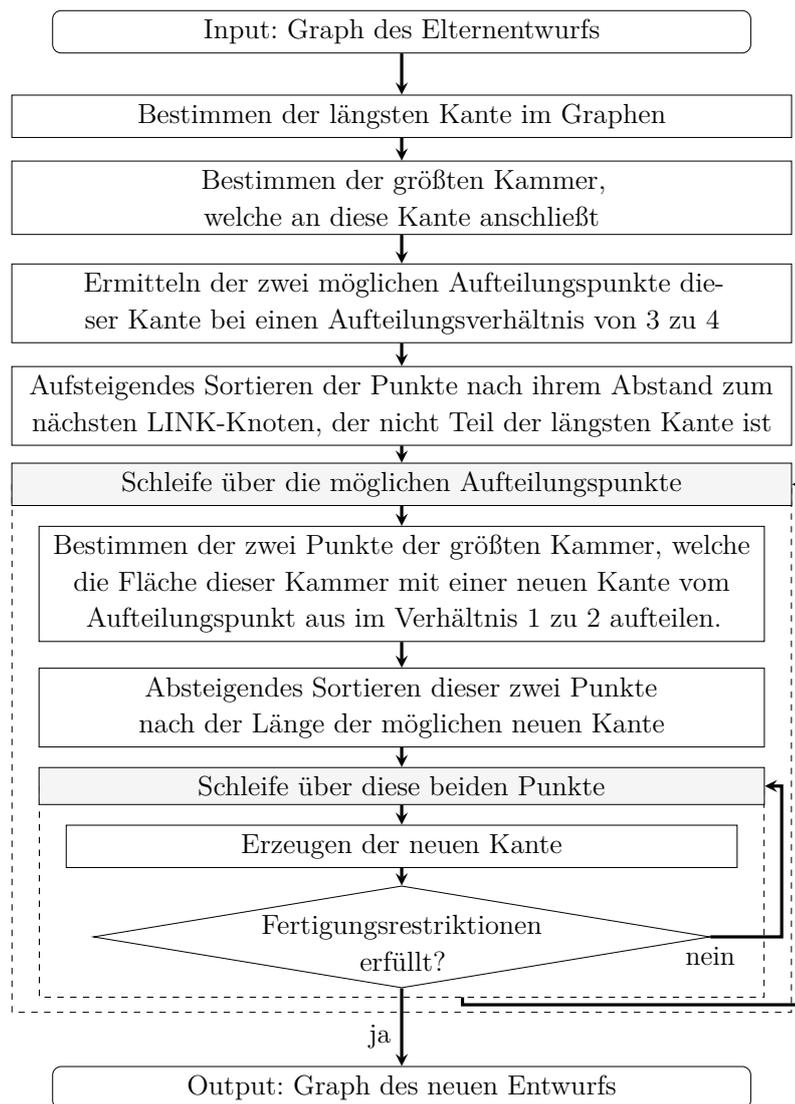


Abbildung 5–10: Ablaufdiagramm der Heuristik *Create Different Wall Lengths*

5.2.5 Insert Small Chambers

Kleine Kammern in den Ecken von axial belasteten Profilstrukturen haben sich als effiziente Maßnahme erwiesen, um die spezifische Energieabsorption zu erhöhen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Insbesondere die Veröffentlichung von Kim (2002) kann als richtungsweisend auf diesem Gebiet angesehen werden. Neben numerischen Untersuchungen und Optimierungen werden in dieser Veröffentlichung vereinfachte semi-empirische Berechnungen für die normierte mittlere Deformationskraft (vgl. Gleichung 5–6 (Kim 2002)) von verschiedenen Querschnittsgeometrien vorgestellt. Dieser Ansatz vernachlässigt jedoch Effekte wie beispielsweise die initiale Kraftspitze.

$$F_{avg,norm} = \frac{F_{avg}}{\sigma_0 A} \quad (5-6)$$

mit

σ_0 Energieäquivalente Fließspannung (vgl. (Kim 2002))

A Fläche der Querschnittsgeometrie

Ein höherer Wert für die normierte mittlere Deformationskraft korreliert mit besseren Energieabsorptionseigenschaften und einer höheren spezifischen Energieabsorption unter axialer Crashbelastung. Abbildung 5–11 stellt den Zusammenhang zwischen der Wandstärke und der normierten mittleren Deformationskraft für verschiedene Querschnittsgeometrien dar. Für die von Kim (2002) vorgeschlagene Topologie wird dabei zusätzlich die Länge C (Länge der Seitenwände der kleinen Kammern im Querschnitt) variiert. Es zeigt sich, dass die vorgeschlagene Querschnittsgeometrie (5.) für alle Wanddicken eine höhere normierte mittlere Deformationskraft als die Referenzgeometrien (1.-4.) aufweist. Diese steigt zudem mit Reduzierung der Größe der kleinen Kammern weiter an.

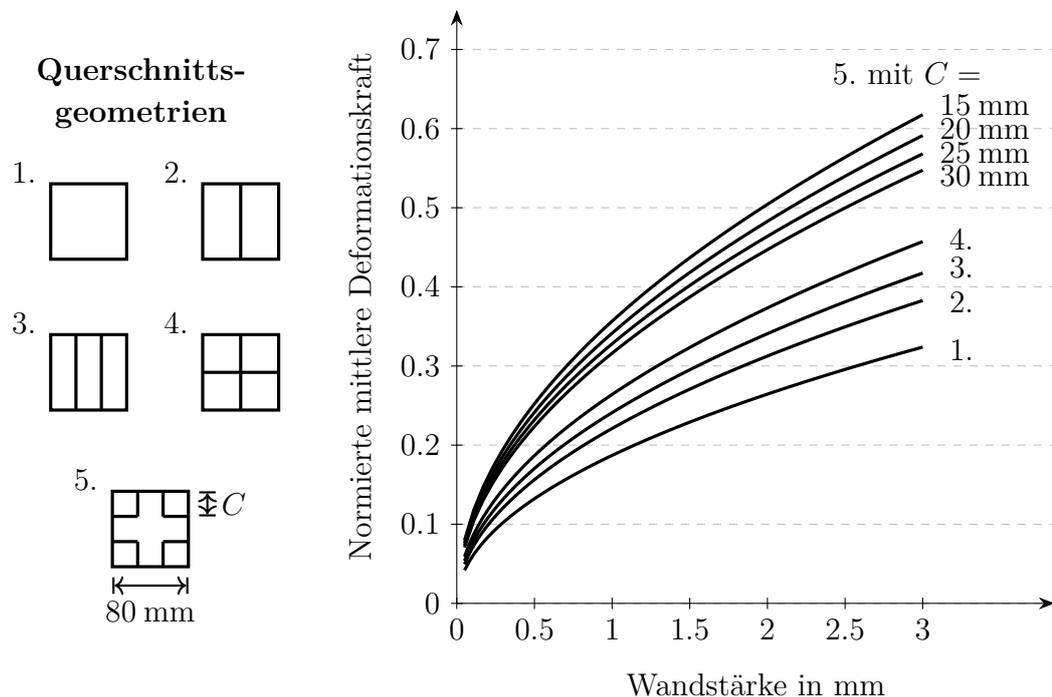
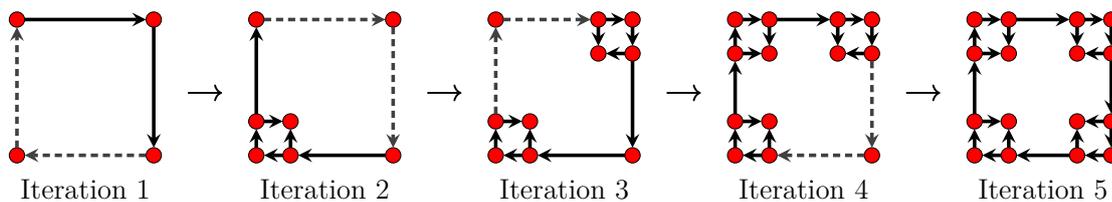


Abbildung 5–11: Vergleich der normierten mittleren Deformationskraft für verschiedene Querschnittsgeometrien (modifiziert aus (Kim 2002))

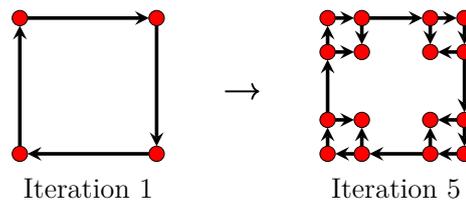
In (Kim 2002) werden darüber hinaus weitere Variationen des Querschnitts mit kleinen Kammern vorgestellt, wovon eine Variante über nochmals bessere Ener-

gieabsorptionseigenschaften verfügt. Da hierfür jedoch üblicherweise die Außen-geometrie verändert werden müsste, wird dieser Ansatz für die Entwicklung der Heuristik nicht weiter verfolgt (vgl. Abschnitt 5.2.1).

Die Heuristik *Insert Small Chambers* (ISC, vgl. Ingenieurprojekt von Dominik Schneider (Anhang A)) hat das Ziel diese vorteilhaften Eigenschaften durch das automatisierte Einbringen von kleinen Kammern in den Ecken der Profilstruktur im Optimierungsablauf der GHT zu berücksichtigen. Eine Möglichkeit ist dabei das sukzessive Einbringen von jeweils einer kleinen Kammer pro Iteration basierend auf den besten Entwürfen der vorangegangenen Iteration. Als Kriterium für die Auswahl einer geeigneten Ecke können geometrische Kriterien sowie die innere Energiedichte (vgl. Abschnitt 5.2.2 bzw. Abbildung 5–12 (a)) herangezogen werden. Dieses Vorgehen führt in der Regel zu einer Verbesserung der spezifischen Energieabsorption der Struktur. Durch die lokale Versteifung tendieren diese Profile jedoch, insbesondere unter schräger Belastung, zu Knick- und Biegeformen. Folglich werden diese Entwürfe bei einer Optimierung mit der GHT in der Regel nicht weiter verfolgt und ausgeglichene Strukturen mit mehreren kleinen Kammern können nicht entstehen.



(a) Sequenzielles Einbringen der Kammern (die gestrichelten Kanten repräsentieren die Wände mit der geringsten summierten inneren Energiedichte in einem exemplarischen Lastfall)



(b) Einbringen aller Kammern in einer Iteration basierend auf rein geometrischen Kriterien

Abbildung 5–12: Schematische Darstellung der Heuristik *Insert Small Chambers*

Aus diesem Grund wird eine Implementierung ähnlich der Heuristik *Create Lattice Structures* (vgl. Abschnitt 3.2.1 bzw. (Ortmann et al. 2021)) gewählt. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 5–12 (b) dargestellt. Im Ablauf der GHT wird geprüft, wie viele kleine Kammern potenziell im Startentwurf der jeweiligen Optimierung erzeugt werden könnten. Die Auswahl von LINK-Knoten, welche sich für die

Erzeugung einer kleinen Kammer eigenen, basiert dabei auf rein geometrischen Kriterien (Teil der Außengeometrie, zwei angrenzende Kanten, eingeschlossener Winkel) und immer auf der Geometrie des Startentwurfs. Der zwischen den Kanten eingeschlossene Winkel darf dabei nicht kleiner als 65° und nicht größer als 125° sein, um stark verzerrte Kanten zu vermeiden.

Die genannten Modifikationen erhöhen die spezifischen Energieabsorptionseigenschaften der Struktur meist signifikant. Folglich sind die anderen Heuristiken nicht in der Lage konkurrenzfähige Entwürfe zu generieren. Zudem können die Wanddicken der Struktur in der inneren Optimierungsschleife der GHT nicht ausreichend skaliert werden, da für die Evaluierung neuer Entwürfe nur eine kleine Anzahl an Funktionsaufrufen zur Verfügung steht (vgl. Abschnitt 3.3.2). Deshalb wird der Entwurf der Heuristik *Insert Small Chambers* erst in der Iteration eingebracht, in der die Entwürfe der anderen Heuristiken eine ähnliche Topologiekategorie haben. Abbildung 5–13 zeigt dieses Vorgehen für exemplarische Startentwürfe mit verschiedenen Außengeometrien.

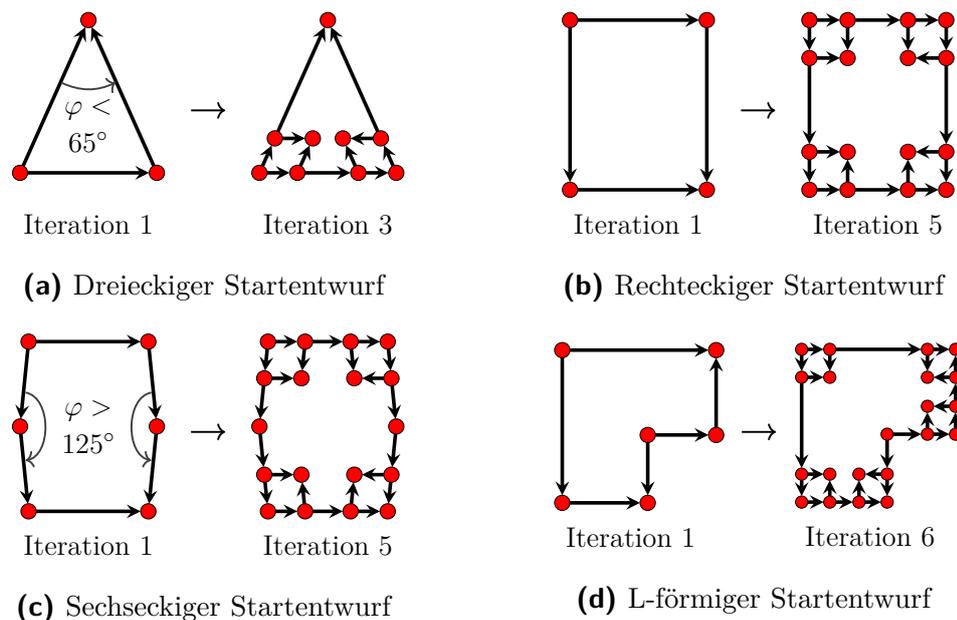


Abbildung 5–13: Exemplarische Entwürfe der Heuristik *Insert Small Chambers* für verschiedene Startentwürfe

Abbildung 5–11 zeigt, dass die mittlere normierte Deformationskraft mit abnehmender Kammergröße ansteigt. Neben den Energieabsorptionseigenschaften müssen jedoch weitere Faktoren wie die Widerstandsfähigkeit der Struktur bzw. der Kammern gegen Knick- und Biegeformen, das Zusammenspiel der Faltenbeulen der unterschiedlichen Wände miteinander (Kim 2002) sowie Fertigungsrestriktionen

tionen berücksichtigt werden. Folglich sind der Länge der Wände einer kleinen Kammer bzw. ihrer Fläche bestimmte Grenzen gesetzt. Als ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen diesen Anforderungen hat sich erwiesen, wenn ein Viertel der eingeschlossenen Fläche des Startentwurfs für kleine Kammern genutzt wird. Diese Fläche wird gleichmäßig auf alle kleinen Kammern aufgeteilt.

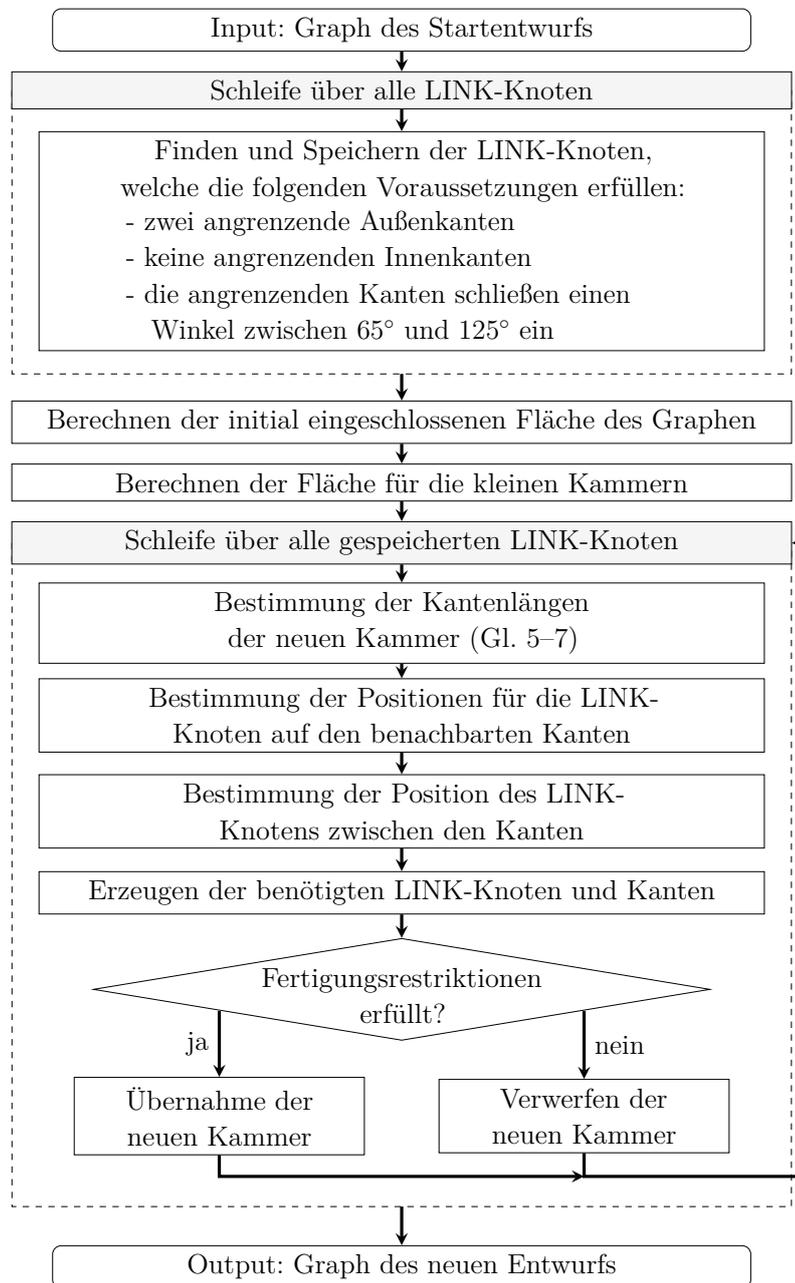


Abbildung 5–14: Ablaufdiagramm der Heuristik *Insert Small Chambers* mit der Einstellung alle kleinen Kammern innerhalb einer Iteration einzubringen

Das Ablaufdiagramm der Heuristik ISC ist in Abbildung 5–14 dargestellt. Nach der bereits beschriebenen Auswahl der geeigneten LINK-Knoten für das Einbringen

von kleinen Kammern wird zunächst die initial eingeschlossene Fläche des Startentwurfs bestimmt. Basierend darauf werden die Flächen der kleinen Kammern aus der Anzahl der möglichen Kammern und dem genannten Verhältnis zwischen kleinen Kammern und initialer Fläche des Startentwurfs von einem Viertel ermittelt. Die kleinen Kammern verfügen dabei alle über die gleiche Fläche. In einer Schleife über die potentiell geeigneten LINK-Knoten werden dann weitere geometrische Eigenschaften der jeweiligen kleinen Kammer ermittelt und die benötigten Graphenelemente erzeugt. Die Länge der Kanten einer kleinen Kammer (vgl. Gleichung 5–7) ist dabei abhängig von der initial eingeschlossenen Fläche, der gesamten Anzahl an kleinen Kammern sowie dem am jeweiligen LINK-Knoten eingeschlossenen Winkel.

$$l = \sqrt{\frac{A}{4n \sin \frac{\pi}{180^\circ} \alpha}} \quad (5-7)$$

mit

- l Kantenlänge der kleinen Kammer
- A Initial eingeschlossene Fläche
- n Anzahl der kleinen Kammern
- α Eingeschlossener Winkel am LINK-Knoten

Nach dem Einbringen einer kleinen Kammer wird die Fertigbarkeit überprüft. Ist diese erfüllt wird die kleine Kammer in den neuen Graphen übernommen. Andernfalls wird die kleine Kammer verworfen und die Schleife beginnt am nächsten potentiell geeigneten LINK-Knoten. Nach dem Durchlaufen aller geeigneten LINK-Knoten wird der neue Graph ausgegeben.

5.2.6 Create Bitubular Structures

Bitubulare Profilstrukturen sind dadurch gekennzeichnet, dass zwei Profilquerschnitte ineinander geschachtelt werden. Über zusätzliche Stege können die Querschnitte miteinander verbunden sein. Stellvertretend für eine Vielzahl von Untersuchungen in der Literatur (vgl. Abschnitt 2.2.2) sollen an dieser Stelle drei Veröffentlichungen genannt werden, welche die Energieabsorptionseigenschaften von bitubularen Strukturen unter axialer Kompression beleuchten. In (Najafi und Rais-Rohani 2011) werden bitubulare Profilstrukturen mit quadratischer Außengeometrie unter quasi-statischer Belastung untersucht. Dabei werden die

Positionen der Stege zwischen Außen- und Innenquerschnitt variiert sowie verschiedene Rotationswinkel für die Innenstruktur untersucht. Ein besonders gutes spezifisches Energieabsorptionsvermögen hat dabei das Profil ohne Rotation der Innenstruktur sowie mit einer Verbindung der Kanten an ihrem Mittelpunkt (vgl. Abbildung 2–14). Das führt zu kurzen Wandlängen und einer hohen Anzahl an Wandknotenpunkten im Querschnitt.

In (Jusuf et al. 2015) werden bitubulare Strukturen mit quadratischer Außengeometrie unter dynamischer Belastung untersucht. Die guten spezifischen Energieabsorptionseigenschaften der Struktur ohne rotierte Innenstruktur mit einer Verbindung der Kanten an ihrem Mittelpunkt werden dabei bestätigt. Pirmohammad und Marzdashti (2016) untersuchen zudem runde, dreieckige und sechseckige Außengeometrien mit verschiedenen skalierten Innenstrukturen und unter schräger Belastung (vgl. Abbildung 2–14). Eine wichtige Erkenntnis ist, dass ein Verhältnis der Wandlängen von 0.5 zwischen Außen- und Innenstruktur über die besten Energieabsorptionseigenschaften verfügt.

Die Heuristik *Create Bitubular Structures* (CBS) ist angelehnt an die vorgestellten Untersuchungen in der Literatur. Ziel ist dabei das automatisierte Erstellen von bitubularen Strukturen basierend auf dem Startentwurf einer Optimierung mit der GHT. Die Heuristik verwendet dafür die im Graphen zur Verfügung gestellten Informationen. Zudem soll die Heuristik flexibel mit unterschiedlichen Außengeometrien umgehen können. Ähnlich der Heuristik *Insert Small Chambers* werden bitubulare Strukturen nur vorgeschlagen, wenn die Topologiekategorie des neuen Entwurfs ähnlich der Topologiekategorie der anderen Entwürfe der jeweiligen Iteration ist. Dazu wird vor dem Aufruf der Heuristik die erwartete Topologiekategorie ermittelt.

Das Ablaufdiagramm der Heuristik ist in Abbildung 5–15 dargestellt. Abbildung 5–16 (a) zeigt schematisch den Ablauf der Heuristik. Als Zentrum für das Erstellen sowie die Rotation des Innenprofils wird der Schwerpunkt des durch den Graphen repräsentierten Querschnitts verwendet. Als Eingangsparameter für die Heuristik stehen der Skalierungsfaktor für die Wandlängen der Innenstruktur (Standard: 0.5), der Rotationswinkel der Innenstruktur (Standard: 0°) sowie die Option, die Verbindungsstege ausgehend von den Kanten oder den LINK-Knoten der Innenstruktur zu generieren (Standard: Die Heuristik wird zweimal mit jeweils unterschiedlicher Option aufgerufen (vgl. Abbildung 5–16 (b) und (c))). Bei der Generierung der Querschnitte wird zudem überprüft, ob der Schwerpunkt innerhalb der Struktur liegt und ob bei der Erstellung der Stege der Schnittpunkt mit dem geringsten Abstand zum Schwerpunkt gewählt wird. Abschließend werden

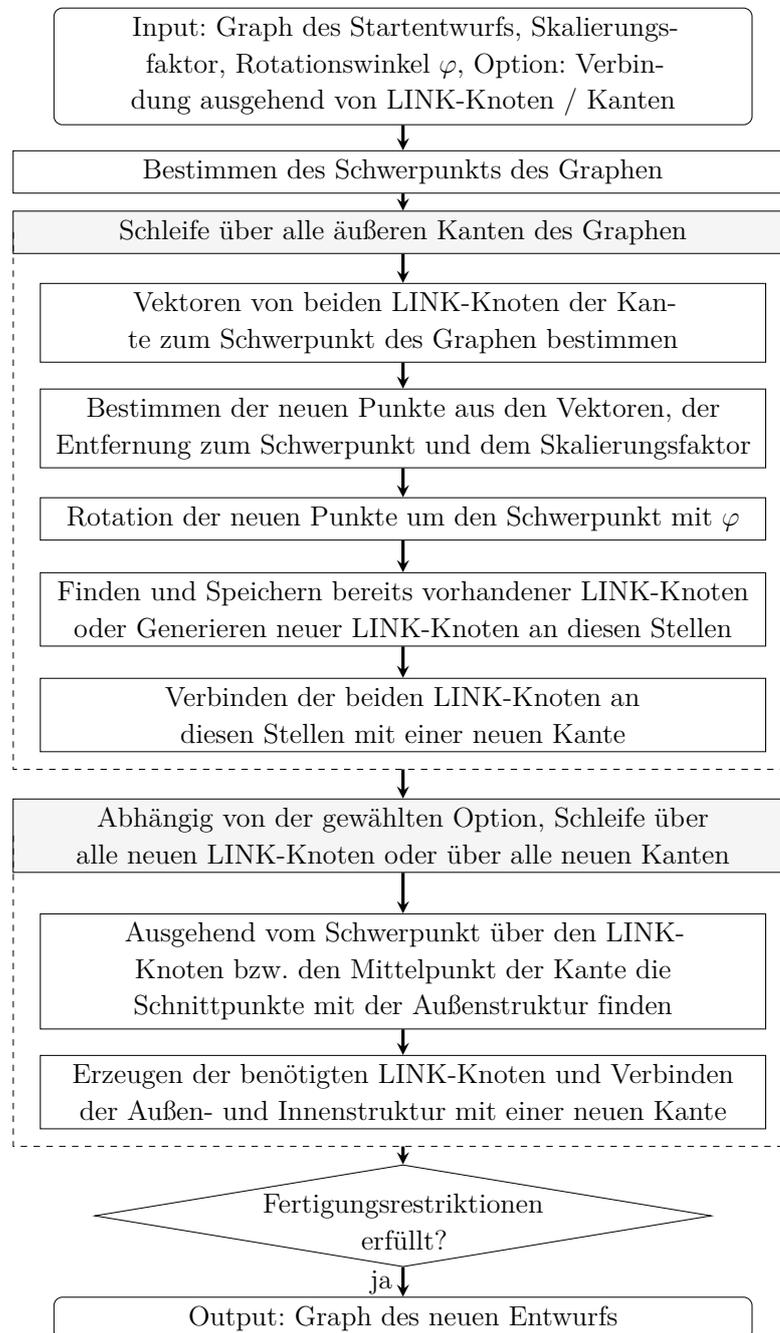
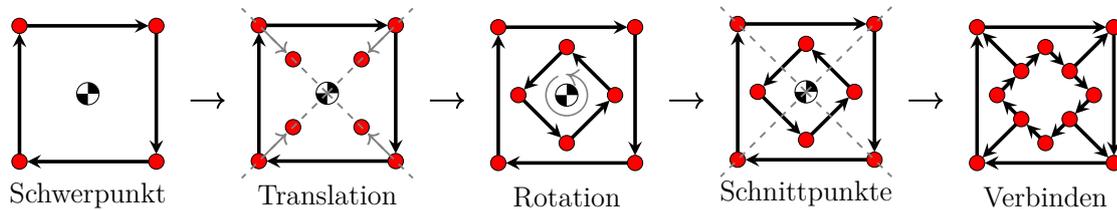
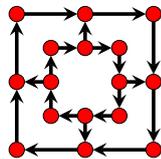


Abbildung 5–15: Ablaufdiagramm der Heuristik *Create Bitubular Structures*

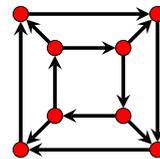
die Fertigungsrestriktionen überprüft. Falls diese erfüllt sind, wird der Graph des neuen Entwurfs ausgegeben.



(a) Schematisches Vorgehen mit einem Skalierungsfaktor von 0.5, einem Rotationswinkel von $\varphi = 45^\circ$ und der Option die Verbindungen ausgehend vom Mittelpunkt der Innenkanten zu initiieren



(b) Option 1: Verbinden der Innen- und Außenstruktur, ausgehend von den Mittelpunkten der Innenkanten



(c) Option 2: Verbinden der Innen- und Außenstruktur, ausgehend von den LINK-Knoten der Innenstruktur

Abbildung 5–16: Schematische Darstellung der Heuristik *Create Bitubular Structures*

5.2.7 Create Cross Structures

Neben Gitterstrukturen, kleinen Kammern und bitubularen Querschnittsgeometrien sind Kreuzstrukturen etablierte Strukturen zur Energieabsorption unter axialer Kompressionsbelastung (vgl. Abschnitt 2.2.2). Alavi Nia und Parsapour (2014) sowie Zhang und Zhang (2014) zeigen für runde, dreieckige, quadratische, sechseckige und achteckige Außengeometrien in Untersuchungen mit quasi-statischer Belastung, dass diese ein besseres spezifisches Energieabsorptionsvermögen als Einkammer-Profile haben, wenngleich die Ergebnisse schlechter sind als bei alternativen Mehrkammer-Strukturen.

Die Heuristik *Create Cross Structures* (CCS) greift diesen Ansatz auf und ermöglicht die automatisierte Generierung von regelmäßigen Kreuzstrukturen, basierend auf rein geometrischen Betrachtungen und dem Startentwurf der Optimierung. Die Topologiekategorie der Entwürfe der Heuristik ist dabei abhängig von der aktuellen Iteration, sodass diese eine ähnliche Topologiekategorie wie die restlichen Entwürfe der Iteration haben. Die Topologiekategorie wird dabei über den relativen Verdrehwinkel

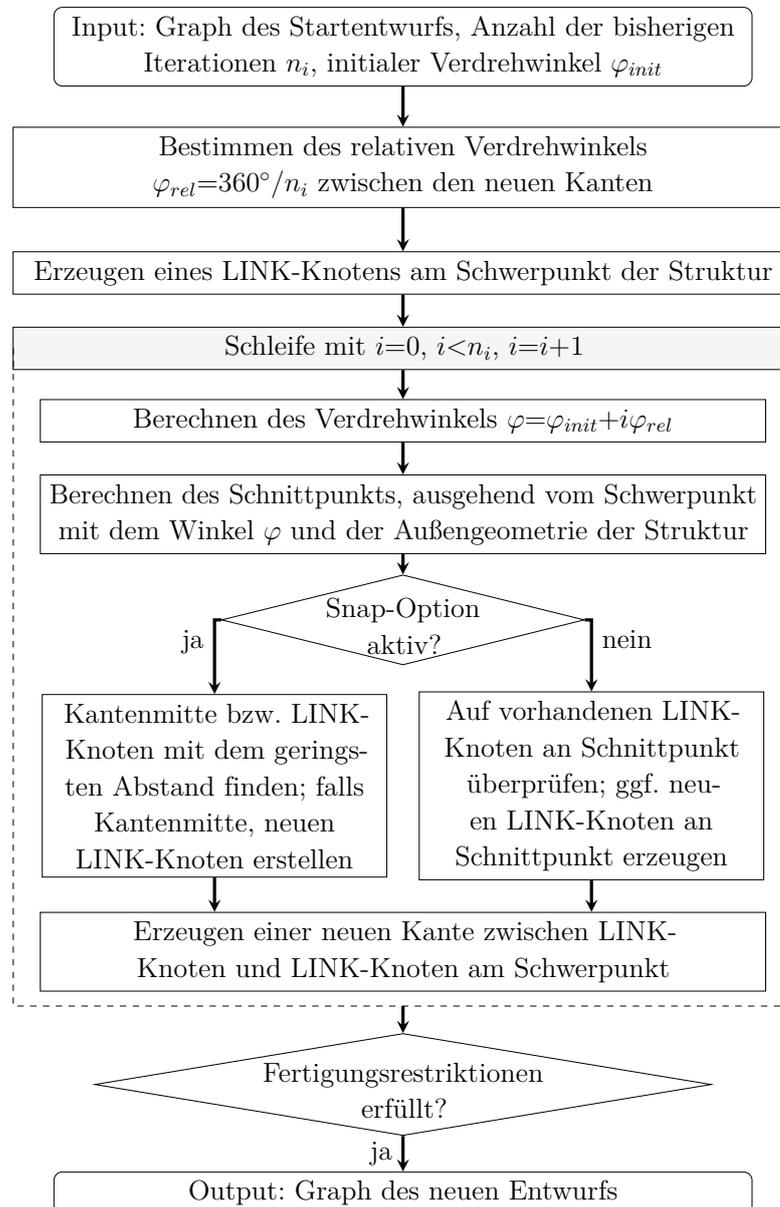


Abbildung 5–17: Ablaufdiagramm der Heuristik *Create Cross Structures*

zwischen den Kanten und folglich der Anzahl der neuen Kanten gesteuert. Der Mittelpunkt der Kreuzstruktur liegt im Schwerpunkt des Profilquerschnitts.

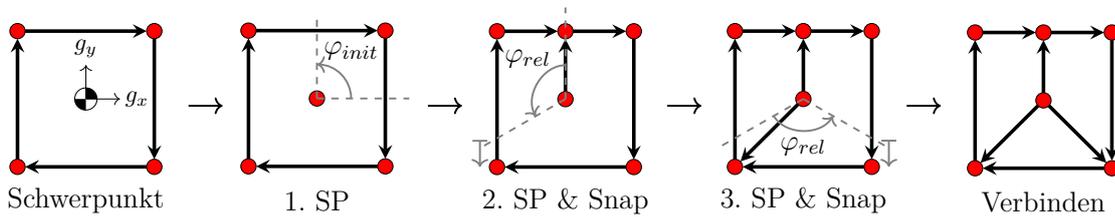


Abbildung 5–18: Schematische Darstellung der Heuristik *Create Cross Structures* in Iteration 3 und mit einem initialen Verdrehwinkel von $\varphi_{init} = 90^\circ$ (SP - Schnittpunkt; Snap - „Einrast“-Option)

Das Ablaufdiagramm der Heuristik ist in Abbildung 5–17 dargestellt. Abbildung 5–18 zeigt den schematischen Ablauf bei der Topologiemodifikation des Graphen. Der initiale Verdrehwinkel φ_{init} (ausgehend von der x-Achse des Graphenkoordinatensystems) ist Teil des Heuristikaufrufs und kann beliebig variiert werden, um eine Vielzahl von Entwürfen zu generieren. Über den relativen Verdrehwinkel φ_{rel} kann die Topologiekategorie des neuen Entwurfs bestimmt werden, da neue Innenkanten mit diesem Winkel relativ zur vorangegangenen Kante eingefügt werden. Er wird basierend auf der Nummer der aktuellen Iteration bestimmt (vgl. Abbildung 5–15), um anschließend über eine ähnliche Topologiekategorie wie die Entwürfe der anderen Heuristiken dieser Iteration zu verfügen. Zudem verfügt die Heuristik über eine „Einrast“-Option (Snap), um die neu erzeugten Kanten mit dem vom Schnittpunkt im geringsten Abstand liegenden LINK-Knoten bzw. mit der Mitte der geschnittenen Kante zu verbinden und somit einfachere Querschnittsgeometrien zu erzeugen. Neben der finalen Überprüfung der Fertigungsrestriktionen wird in der Heuristik zudem geprüft, ob der Schwerpunkt innerhalb der Struktur liegt und dass eine vorgegebene maximale Anzahl an Kanten im mittleren LINK-Knoten (am Schwerpunkt) nicht überschritten wird (Standardwert: max. 5 Kanten am Mittelpunkt).

5.3 Heuristiken zur Initiierung und Aufrechterhaltung von Faltenbeulen

Für eine effektive Umwandlung von kinetischer in innere Energie wird in der Regel angestrebt, dass axial crashbelastete Profilstrukturen mittels Faltenbeulen deformieren. Tritt bereits ab Deformationsbeginn globale Biegung auf oder geht

eine Faltenbeulform in eine Biegedeformation über, so kann die Energie in der Regel nicht mehr effizient umgewandelt werden (vgl. Abschnitt 2.2). Zudem kann die strukturelle Integrität oft nicht mehr gewährleistet werden. Im äußersten Fall werden in der Folge die Anforderungen an die Crashstruktur nicht erfüllt, da nachgeschaltete Strukturen beschädigt oder Grenzwerte für die Insassenbelastungen überschritten werden (vgl. Abschnitt 2.1).

Ursächlich für das Deformieren mittels globaler Biegung ist neben den Eigenschaften der Profilstruktur (z.B. Querschnittstopologie bzw. -geometrie, Profillänge, Material) häufig eine schräge Lasteinleitung, bedingt durch den Lastfall oder die umgebenden Bauteile. Die Herausforderungen bei der robusten Initiierung und Aufrechterhaltung von Faltenbeulen steigen zudem mit unterschiedlichen oder streuenden Lastfällen und Randbedingungen sowie streuenden Struktureigenschaften (z.B. Materialkennwerte, Geometrie) weiter an. Diese können Verzweigungspunkte im Strukturverhalten bzw. in den Strukturantworten aktivieren, welche zu einem ungewollten Deformationsverhalten führen.

Um dieser Herausforderung zu begegnen, ist eine sorgfältige Abstimmung zwischen der Profilstruktur und den umliegenden Komponenten sowie den entsprechenden Lastfällen erforderlich. Zudem sind Triggermechanismen als Anfalhilfe und zur Unterstützung der Faltenbeulform Stand der Technik und in der Automobilindustrie etabliert (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Aufgrund der Bedeutung von Robustheit bei der Auslegung von axial belasteten Crashstrukturen (vgl. Abschnitt 2.1 und Abschnitt 2.2) und dem signifikanten Einfluss der u.a. dafür ergriffenen Maßnahmen (z.B. Triggermechanismen) auf das Deformationsverhalten, sollte dieser Aspekt ebenfalls im Rahmen der Strukturoptimierung mit der GHT berücksichtigt werden. In den folgenden Abschnitten wird folglich der Aspekt der automatisierten Triggereinbringung im Prozess der GHT sowie Modifikationen der Topologie mit Heuristiken zur Verbesserung der Widerstandsfähigkeit gegen globale Biegung betrachtet.

5.3.1 Unterstützen des „natürlichen“ Faltenbeulmusters

Wie im vorangegangenen Abschnitt diskutiert, ist ein robustes Deformationsverhalten ein wichtiges Ziel bei der Auslegung von axial belasteten Crashstrukturen. Eine Möglichkeit dieses Ziel zu erreichen ist, das Deformationsverhalten der Profilstruktur ohne Triggermechanismen zu analysieren und, basierend darauf, Trigger einzubringen, welche das „natürliche“ Faltenbeulmuster unterstützen. Ein Vorteil

dieses Vorgehens ist, dass Kraftspitzen in der Kraft-Weg-Kurve reduziert werden können, solange diese nicht durch die initiale Spannungswelle (vgl. Abschnitt 2.2) bedingt sind.

Dieser Ansatz wird in der vorliegenden Arbeit nicht verfolgt. Um diesen Ansatz in der GHT umsetzen zu können, müsste für jeden Topologieentwurf mindestens ein zusätzlicher Funktionsaufruf ohne Trigger durchgeführt werden. Die Heuristik könnte die FE-Ergebnisdaten dieses Aufrufs analysieren und, basierend darauf, Trigger, beispielsweise an der Stelle der ersten signifikanten plastischen Deformation (vgl. Abschnitt 5.3.2), aufprägen. Nachteilig an diesem Ansatz ist daher, dass der aktuelle Ablauf der GHT grundlegend verändert werden müsste und eine signifikante Anzahl an zusätzlichen Funktionsaufrufen notwendig wäre. Zudem stellt sich die Frage, wie mit einem unterschiedlichen Deformationsverhalten der Struktur in verschiedenen Lastfällen umgegangen werden kann.

5.3.2 Enforce Deformation Start Position

Bei der Auslegung von axial belasteten Crashstrukturen gibt es oftmals Vorgaben (z.B. aus Entwicklungsrichtlinien), an welcher Stelle in Profillängsrichtung eine Crashbox oder ein Längsträger die ersten (plastischen) Deformationen aufweisen und folglich bei Faltenbeulen die erste Falte werfen oder bei gewünschtem Knicken das entsprechende Fließgelenk ausbilden soll. Ziel ist es, ein vorhersehbares und robustes Deformationsverhalten zu erreichen.

Der Ansatz der Heuristik *Enforce Deformation Start Position* (EDSP) hat zum Ziel, jenen Abschnitt des Extrusionsprofils zu identifizieren, in welchem es zur ersten signifikanten plastischen Deformation (z.B. durch Faltenbeulen) kommt. Weicht dieser Punkt von einem vorgegebenen Punkt ab, werden Maßnahmen ergriffen, um die erste Deformation an der gewünschten Stelle zu forcieren. Die Heuristik ist folglich in zwei Schritte untergliedert. Zunächst wird das Deformationsverhalten analysiert und anschließend entsprechende Maßnahmen (z.B. durch das Einbringen von Triggern) eingeleitet. Diese Heuristik ist in den Ablauf der GHT als eine Heuristik zur Formoptimierung implementiert (vgl. Abschnitt 3.2.2) und wird auf alle Entwürfe der Heuristiken zur Topologieänderung angewendet.

Detektion

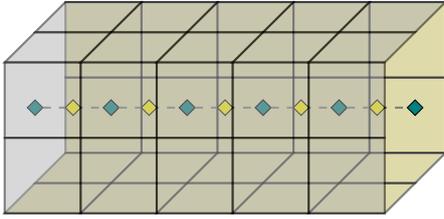
Das Vorgehen zur Detektion der ersten signifikanten plastischen Deformation ist angelehnt an das Verfahren zur Dimensionsreduktion aus (Diez 2019). Dabei werden die maximalen plastischen Dehnungen der Profilstruktur über die Bauteillängsachse (hier Extrusionsrichtung) auf eine eindimensionale Kurve im dreidimensionalen Raum abgebildet, um somit eine Verteilungsfunktion der maximalen plastischen Dehnungen über die Bauteillängsachse zu erhalten. Dieses Vorgehen ermöglicht eine vereinfachte Analyse der Simulationsergebnisse.

Im Gegensatz zu (Diez 2019) wird das Bauteil in dem hier vorgestellten Ansatz nicht auf eine parametrisierte, nichtlineare Bézier-Regressionsskurve reduziert. Stattdessen wird die für die Vernetzung benötigte Spline-Beschreibung (vgl. Abschnitt 3.1) genutzt. Der Vorteil ist, dass keine zusätzlichen Polynom-Parameter für die Bézier-Regressionsskurve bestimmt werden müssen und alle benötigten Informationen im GHT Prozess vorhanden sind. Zudem folgt der Spline dem Verlauf des Extrusionsprofils exakt. Der Informationsverlust durch die Dimensionsreduktion wird somit reduziert. Weiter werden im Gegensatz zu (Diez 2019) im vorliegenden Ansatz keine unterschiedlichen Bauteile (z.B. unterschiedliche Varianten eines Längsträgers) miteinander verglichen, sondern die Simulationsergebnisse einer einzelnen Profilstruktur analysiert.

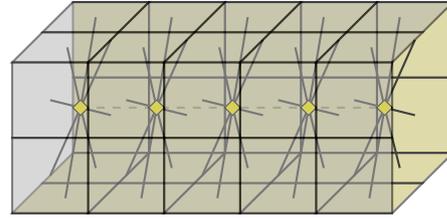
Der Ablauf zur Bestimmung der Verteilungsfunktion, für welche die maximalen plastischen Dehnungen des Profils auf die eindimensionale Kurve abbildet werden, ist schematisch in Abbildung 5–19 dargestellt. Ausgehend von den Splinepunkten zur Erstellung des FE-Modells (vgl. Abschnitt 3.1) werden im ersten Schritt Zwischenpunkte auf dem Spline bestimmt, welche sich auf Höhe der Elementmitten der einzelnen Elementreihen befinden. Im zweiten Schritt werden alle Schalenelemente jeweils dem Zwischenpunkt auf dem Spline mit dem geringsten euklidischen Abstand zugeordnet. Der Algorithmus ist robust hinsichtlich Fehlstellen (z.B. durch Ausschnitte oder abgeschnittene Profilenden) sowie neu vernetzter Profilabschnitte, welche aus diesen Modifikationen resultieren können. Die Zwischenpunkte entsprechen dabei einem Punkt auf einer normierten eindimensionalen Kurve in Extrusionsrichtung mit der Laufvariablen u . Für u gilt $0 \leq u \leq 1$.

Im dritten Schritt werden die maximalen plastischen Dehnungen für alle Elemente und Zeitschritte aus den FE-Ergebnisdaten ausgelesen. Über die Zuordnung der Finiten Elemente zu den Splinepunkten werden die plastischen Dehnungen in jedem Zeitschritt für alle Finiten Elemente eines Zwischenpunkts aufsummiert (vgl. Gleichung 5–8) und über u aufgetragen. Das Ergebnis ist die Verteilungsfunktionen

1. Element-Spline-Punkte (\diamond , sp_e) als Zwischenpunkte aus FE-Knoten-Spline (\blacklozenge) bestimmen



2. Zuordnen aller Finite Elemente zu den jeweiligen Element-Spline-Punkten



3. Abbilden (mapping) der maximalen plastischen Dehnungen (für jeden Zeitschritt) auf eine 1D-Kurve

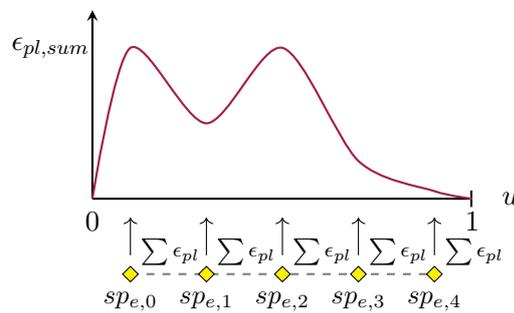


Abbildung 5–19: Schematischer Ablauf zum Bestimmen der Verteilungsfunktion der plastischen Dehnungen ($\epsilon_{pl,sum}$ sind die aufsummierten maximalen plastischen Dehnungen an einem Element-Spline-Punkt)

der plastischen Dehnungen im jeweiligen Lastfall und Zeitschritt. Eine Normierung der Kurven (z.B. auf den Maximalwert) findet nicht statt, da kein Vergleich zwischen verschiedenen Bauteilen oder Bauteilvarianten durchgeführt wird.

$$\epsilon_{pl,sum,t,i} = \sum_{n_e=1}^{N_e} \epsilon_{pl,e,t} \quad (5-8)$$

mit

$e \in \{FE\}_i$ Finites Element aus der Menge der Finiten

Elemente am Element-Spline-Punkt i

$i = 0, \dots, N_{sp_e}$ (Anzahl der Element-Spline-Punkte)

$t = 0, \dots, N_t$ (Anzahl der Zeitschritte)

Abbildung 5–20 zeigt exemplarisch Verteilungsfunktionen der plastischen Dehnungen für drei verschiedene Impaktorneigungswinkel bei einem quadratischen Aluminiumprofil unter axialer Crashbeanspruchung. In jedem Diagramm sind die

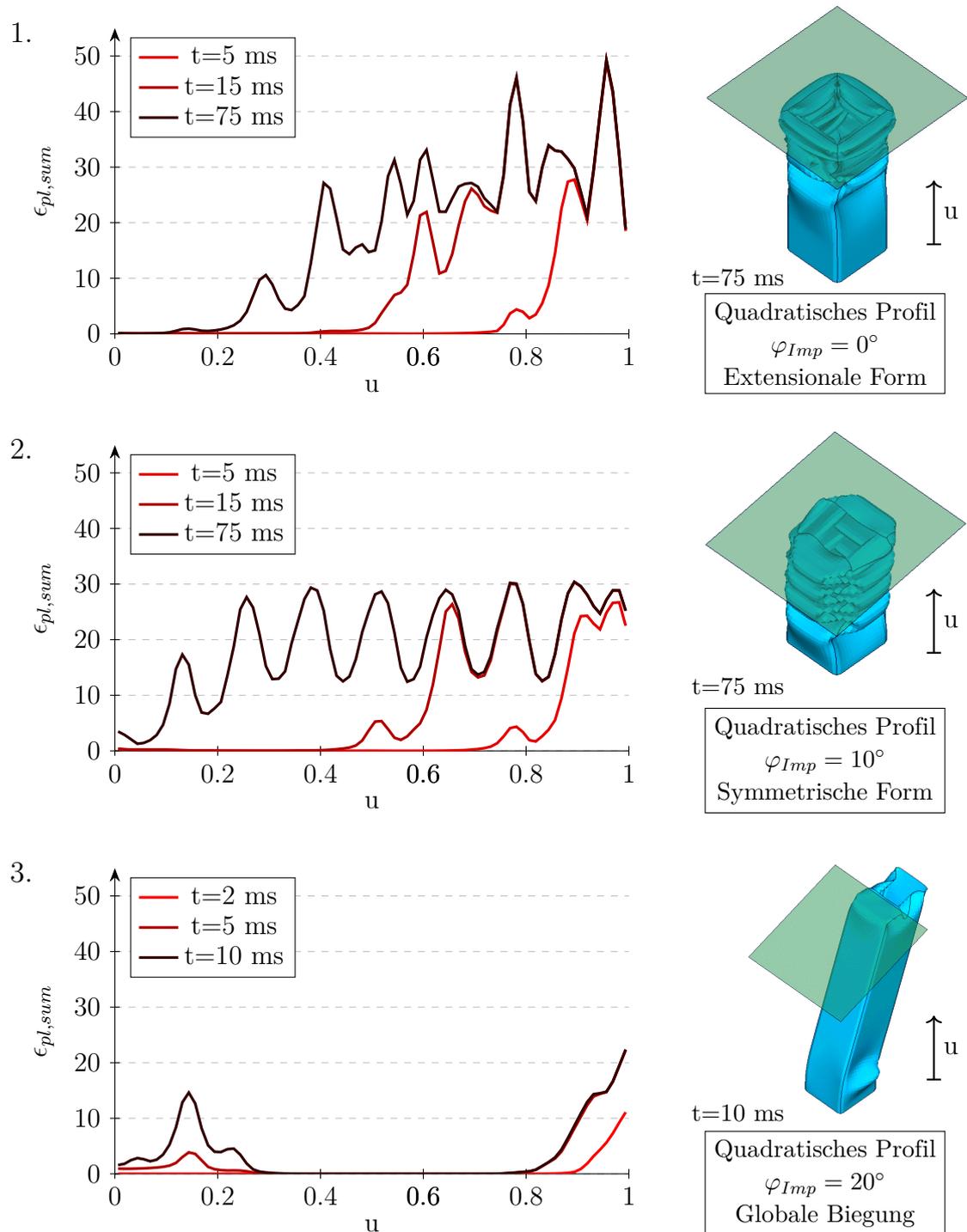


Abbildung 5–20: Exemplarische Darstellung der Verteilungsfunktion der plastischen Dehnungen zu verschiedenen Zeitpunkten bei einer quadratischen Profilstruktur unter variierenden Belastungswinkeln φ_{Imp}

Verteilungsfunktionen für ausgewählte Zeitschritte dargestellt. Über die Betrachtung der zeitlichen Veränderung dieser Kurven lässt sich für alle drei Impaktoreneigungswinkel die zeitlich erste signifikante plastische Deformationen auf der impaktierten Seite ermitteln. Ein spannender, jedoch an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigter Effekt ist, dass sich die unterschiedlichen Deformationsformen in diesem Fall anhand der Verteilungsfunktionen klar differenzieren lassen:

1. Extensionale Form: Hohe Werte für die Summen der plastischen Dehnungen auf der impaktierten Seite, welche sich jedoch beim Übergang auf eine symmetrische Form reduzieren
2. Symmetrische Form: Regelmäßiger Verlauf der Verteilungsfunktion
3. Globale Biegung: Zwei wesentliche Deformationszentren

An die Auswertung der zeitlichen Veränderung der Verteilungsfunktion der plastischen Dehnungen knüpft die Analyse der Heuristik *Enforce Deformation Start Position* an. Zunächst wird der maximal auftretende Wert der in jedem Abschnitt aufsummierten plastischen Dehnungen bestimmt. Anschließend wird eine transiente Analyse der Verteilungsfunktionen der plastischen Dehnungen über die Simulationsdauer durchgeführt. Dabei wird analysiert, an welchem Wert für u zum ersten Mal ein bestimmter Grenzwert in der Verteilungsfunktion überschritten wird. Als Grenzwert für eine erfolgreiche Detektion haben sich dabei 50 % des maximal über alle Zeitschritte auftretenden Wertes als vorteilhaft erwiesen. Der ermittelte Ort auf der Verteilungsfunktion wird als der Ort der ersten signifikanten plastischen Deformation und folglich als Deformationsstartpunkt im jeweiligen Lastfall festgelegt. Dieses Vorgehen ist im ersten Abschnitt des Ablaufdiagramms der Heuristik in Abbildung 5–21 dargestellt.

Maßnahmen

Basierend auf den detektierten Deformationsstartpunkten der verschiedenen Lastfälle überprüft die Heuristik, ob der ermittelte Startpunkt von dem durch den Anwender vor der Optimierung festgelegten Startpunkt in einem der Lastfälle abweicht. Um kleine Abweichungen z.B. aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Detektion zu erlauben, wird eine Toleranz von ± 0.05 für die normierte Position eingeführt. Falls eine Abweichung festgestellt wird, wird weiter überprüft, ob in den vorangegangenen Iterationen bereits Maßnahmen durch die Heuristik EDSP ergriffen wurden. Falls nein, werden erstmalig Trigger nach einem durch den Anwender vorgegebenen Muster aufgebracht. Wenn bereits in den vorangegangenen

Iterationen Trigger aufgebracht wurden, werden diese Maßnahmen im Folgenden verstärkt (intensiviert), was bei Verprägungen einer größeren Verprägungstiefe und bei Anfasungen einer größeren relativen Tiefe entspricht. Das entsprechende Vorgehen ist im Ablaufdiagramm der Heuristik in Abbildung 5–21 dargestellt.

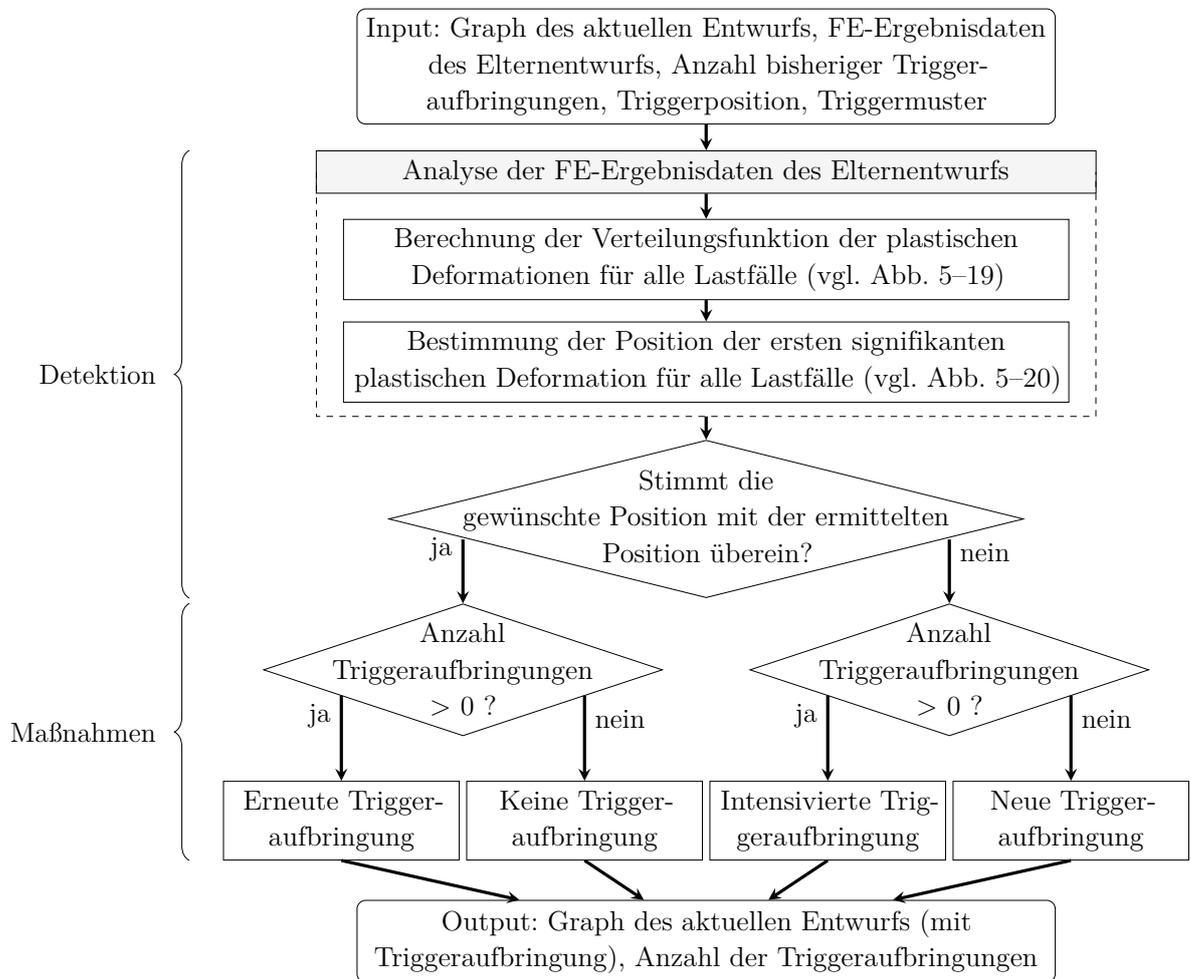


Abbildung 5–21: Ablaufdiagramm der Heuristik *Enforce Deformation Start Position*

Die folgenden Muster sind auf Basis der in Abschnitt 4.3 vorgestellten Triggermechanismen in die Methode implementiert:

1. **Indent Edges Simple:** Einfaches Muster mit Wandverprägungen, bei dem alle Außenwände eine Vertiefung aufgeprägt bekommen.
2. **Indent Edges Vertical:** Muster mit Wandverprägungen, bei dem alle in Bezug auf das Graphenkoordinatensystem vertikalen Außenwände (Richtung der g_y -Achse mit einer Toleranz von $\pm 30^\circ$) eine Vertiefung aufgeprägt bekommen.

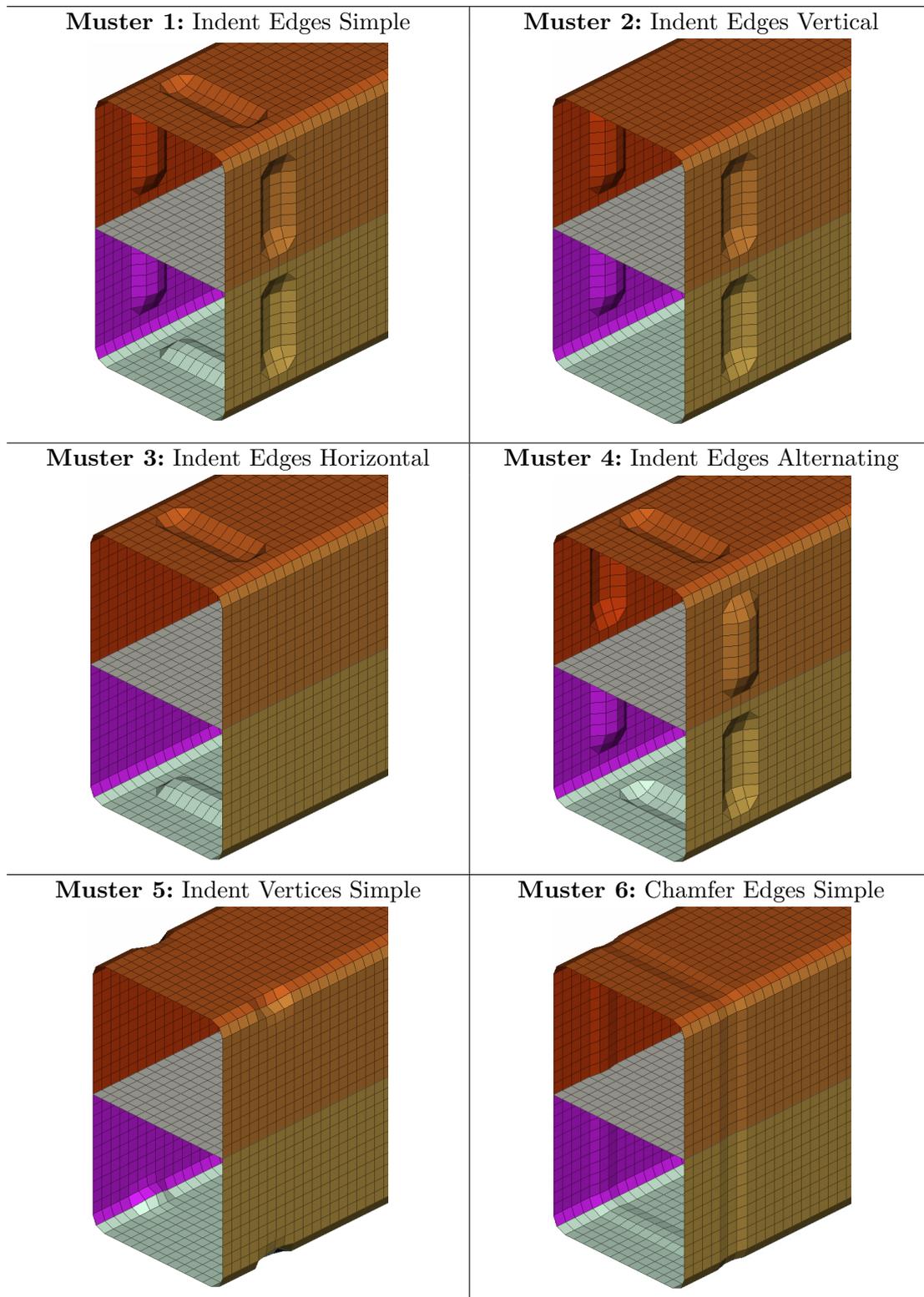


Abbildung 5–22: Muster für die automatisierte Aufbringung von Triggern durch die Heuristik *Enforce Deformation Start Position*

3. **Indent Edges Horizontal:** Muster mit Wandverprägungen, bei dem alle in Bezug auf das Graphenkoordinatensystem horizontalen Außenwände (Richtung der g_x -Achse mit einer Toleranz von $\pm 30^\circ$) eine Vertiefung aufgeprägt bekommen.
4. **Indent Edges Alternating:** Muster mit Wandverprägungen, bei dem ausgehend von der längsten Kante im Graphen abwechselnd Wände nach innen und außen verprägt werden.
5. **Indent Vertices Simple:** Muster mit Eckverprägungen, bei dem alle Profilecken an der Profil-Außenseite, welche nur zwei angrenzende Wände haben und welche sich unter einem Winkel zwischen 30° und 150° schneiden, verprägt werden.
6. **Chamfer Edges Simple:** Einfaches Aufbringen einer Anfasung auf alle äußeren Wände.

Eine Anwendung der implementierten Triggermuster für eine exemplarische Strangpressprofilstruktur ist in Abbildung 5–22 dargestellt. Die Trigger der vorangegangenen Iteration werden vor dem Aufbringen eines neuen Triggermusters gelöscht. Das ermöglicht das Aufbringen eines an die aktuelle Querschnittstopologie angepassten Triggermusters. Die Triggerposition kann zudem bei der Evaluierung neuer Entwürfe und bei der finalen Formoptimierung und Dimensionierung als Entwurfsvariable genutzt werden (vgl. Abschnitt 3.3.2). Möglich ist dabei die Wahl einer gemeinsamen Entwurfsvariable für die Positionen aller Trigger oder jeweils einer unabhängigen Entwurfsvariable pro Trigger. Die implementierten Muster stellen zudem nur eine kleine Auswahl an möglichen Varianten dar. Der modulare Aufbau der Heuristik ermöglicht die einfache Implementierung weiterer Muster.

5.3.3 Counter Global Bending

Während die beiden vorangegangenen Heuristiken ein robustes Faltenbeulen durch das Einbringen von Triggern unterstützen sollen, ist das Ziel der Heuristik *Counter Global Bending* (CGB, vgl. Masterarbeit von Enrique Benavides Banda (Anhang A)) globaler Biegung durch topologische Modifikationen der Querschnittsgeometrie entgegenzuwirken. Da die topologischen Maßnahmen von der (vorwiegenden bzw. prädominanten) Biege- bzw. Deformationsrichtung abhängig sind, ist zunächst eine Analyse bzw. Detektion des Deformationsverhaltens der Profilstruktur notwendig. Dabei wird die prädominante Deformationsachse im Graphenkoordinatensystem bestimmt, welche entweder der x- oder der y-Achse im Graphenkoordinatensystem entspricht. Basierend auf der prädominanten Deformationsachse

im Graphenkoordinatensystem werden im weiteren Prozess neue Wände in den Profilquerschnitt eingebracht.

Detektion

Ziel der Detektion ist die Bestimmung der wesentlichen Deformations- bzw. Biegerichtung der Profilstruktur in den vorliegenden Lastfällen. Die für diese Analyse notwendigen Informationen sind in den FE-Ergebnisdaten der Lastfälle implizit in den FE-Knotenverschiebungen enthalten. Für eine effiziente Auswertung erfolgt eine geometriebasierte Dimensionsreduktion auf eine dreidimensionale Schwerpunktkurve. Das Vorgehen zur Detektion ist angelehnt an die Arbeit von Diez (2019). Für die Heuristik *Counter Global Bending* wird dabei, im Gegensatz zum Vorgehen in der Heuristik *Enforce Deformation Start Position*, nur der Ansatz zur geometrischen Vereinfachung aufgegriffen.

Die Motivation für die geometrische Dimensionsreduktion des FE-Modells bzw. von FE-Ergebnisdaten auf eine dreidimensionale Schwerpunktkurve ist eine vereinfachte Analyse des Deformationsverhaltens der Profilstrukturen. Diese resultiert daraus, dass eine geringere Anzahl an Punkten im Raum untersucht werden muss, welche zusätzlich über eine Reihenfolgeninformation verfügen. Eine Untersuchung der Kurve kann folglich unabhängig vom FE-Netz erfolgen. Zudem erleichtert die Reihenfolgeninformation der Punkte der Schwerpunktkurve die Bestimmung des Deformationsverhaltens, da die Enden der Kurve festgelegt und die angrenzenden Schwerpunkte für jeden Punkt der Schwerpunktkurve definiert sind.

Die Berechnung der Schwerpunktkurve erfolgt analog zum Vorgehen in der Heuristik *Enforce Deformation Start Position* (vgl. Abbildung 5–19 - 1. und 2. Schritt). Aufgrund der im automatisierten Vernetzungsprozess vorhandenen Informationen ist eine Erstellung der Schwerpunktkurve ohne die Verwendung der Bézier-Regression, welche von Diez (2019) verwendet wird, möglich. Dadurch werden die mit der Bestimmung des Bézier-Polynoms zusammenhängenden Schwierigkeiten, wie die Bestimmung des Polynom-Grades, vermieden.

Abbildung 5–23 zeigt das Ablaufdiagramm der Heuristik zur Detektion der prädominanten Deformationsachse im Graphenkoordinatensystem. Diese liegt entweder auf der x- oder der y-Achse des Graphenkoordinatensystems. Die Zuordnung und Gruppierung aller Finiten Elemente für die Schwerpunktkurve erfolgt analog zum ersten und zweiten Schritt in Abbildung 5–19. Basierend darauf erfolgt die Berechnung der Koordinaten der Schwerpunktkurve mit Gleichung 5–9 für jeden

Lastfall und jeden Zeitschritt. Abbildung 5–24 zeigt exemplarische Schwerpunktkurven für eine quadratische Profilstruktur in verschiedenen Zeitschritten sowie in verschiedenen Lastfällen. Für eine bessere Darstellung werden die Informationen der dreidimensionalen Koordinaten auf die yz -Ebene projiziert. Eine höhere Intensität der roten Markierung lässt dabei auf Bereiche mit höherer Stauchung bzw. Kompression schließen. Um den Einfluss von lokalen Effekten auf die Schwerpunktkurve zu reduzieren, erfolgt eine Filterung mit einem zentrierten gleitenden Mittelwert (Fenstergröße: fünffache FE-Zielkantenlänge). Der Schwerpunkt der Finiten Elemente an einem Spline-Punkt wird wie folgt berechnet:

$$cog_{i,t} = \frac{\sum_{n_e=1}^{N_e} m_e \cdot p_{e,t}}{\sum_{n_e=1}^{N_e} m_e} \quad (5-9)$$

mit

$cog_{i,t}$ Schwerpunkt der Finiten Elemente an einem Spline-Punkt

$p_{e,t}$ Position des Schwerpunkts eines Finiten Elements

m_e Masse eines Finiten Elements

e Finite Elemente an einem Element-Spline-Punkt ($e = 0, \dots, N_e$)

i Zählvariable der Element-Spline-Punkte ($i = 0, \dots, N_{spe}$)

t Zeitschritte ($t = 0, \dots, N_t$)

Um die prädominante Deformationsachse im Graphenkoordinatensystem zu ermitteln, müssen Starrkörperbewegungen der Profilstruktur, welche beispielsweise durch Fahrzeugtranslation und -rotation im Crash vorhanden sind, weitestgehend herausgerechnet werden. Aufgrund der (großen) Deformation der Struktur und möglicher Rotationen ist ein Ansatz zur Eliminierung der Starrkörperbewegungen über den Schwerpunkt der Profilstruktur nicht ausreichend. Stattdessen soll ein lokales Koordinatensystem erzeugt werden, welches sich mit der Struktur mitbewegt. Dabei zeigt die z -Achse des lokalen Koordinatensystems in Extrusionsrichtung und die x - bzw. y -Achse stimmt mit dem Graphenkoordinatensystem in der Querschnittsebene überein. Üblicherweise verfügen axial crashbelastete Profilstrukturen über ein Profilende, welches vom Crash abgewandt ist und folglich von nachgeschalteten Komponenten abgestützt wird (z.B. wird die Crashbox in der Regel von einem Längsträger abgestützt - vgl. Abschnitt 2.1). Dieses Ende deformiert meist weniger stark und/oder später im Crash und soll daher als Referenzseite verwendet werden. Der Ursprung des lokalen Koordinatensystems wird dort platziert.

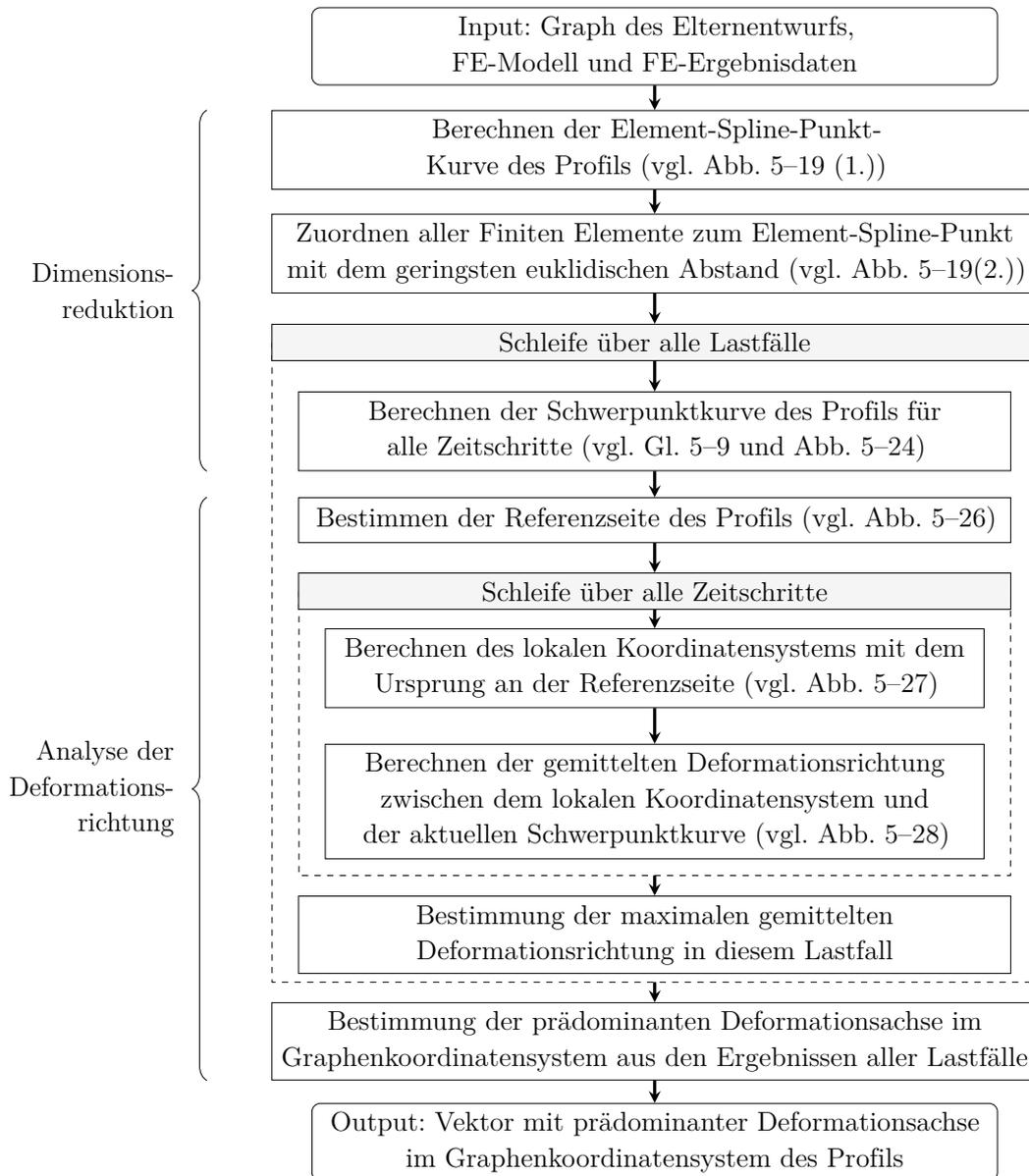


Abbildung 5-23: Ablaufdiagramm zur Detektion der prädominanten Deformationsachse im Graphenkoordinatensystem in der Heuristik *Counter Global Bending* (modifiziert aus Masterarbeit von Enrique Benavides Banda (vgl. Anhang A))

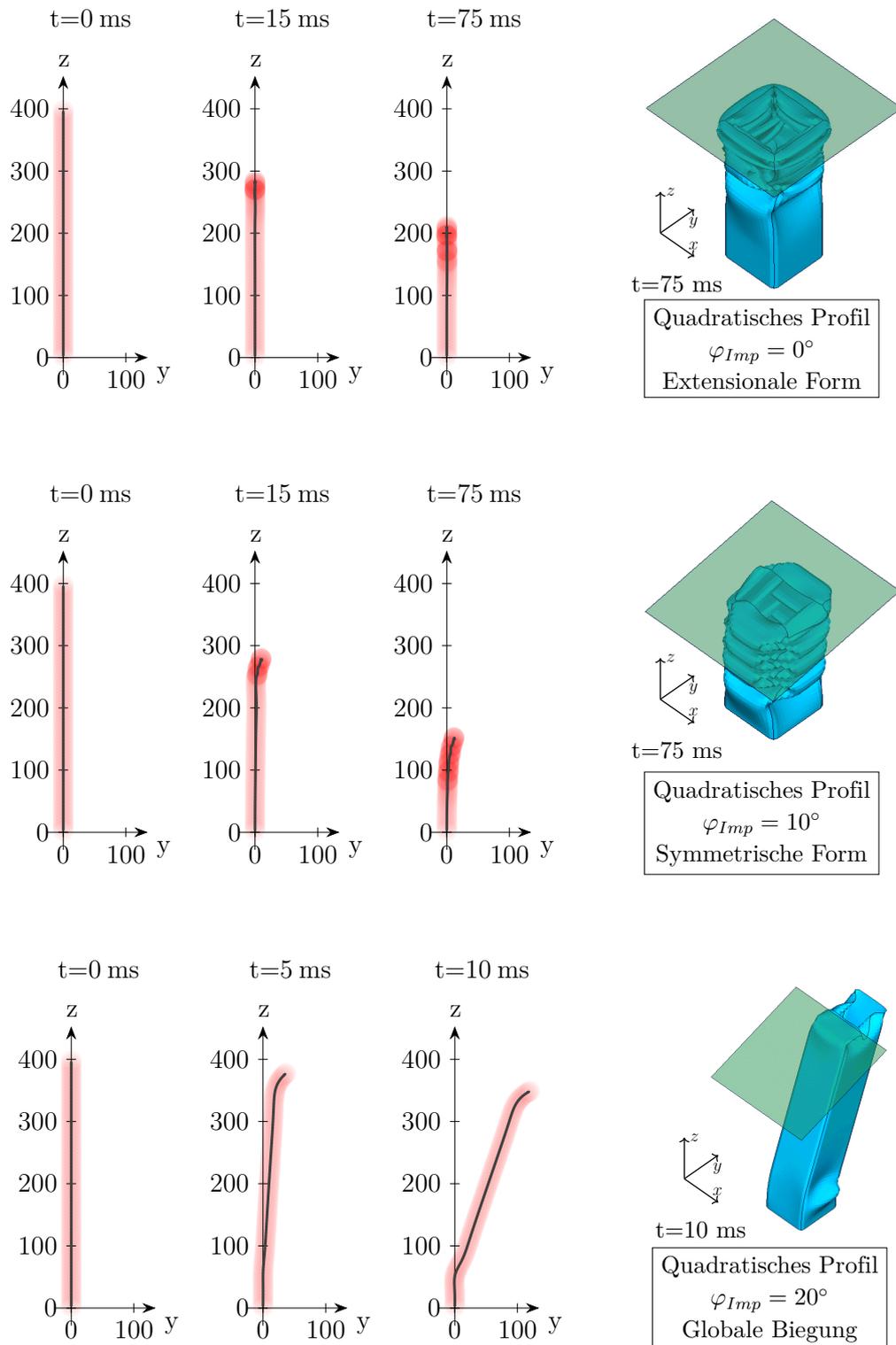


Abbildung 5–24: Exemplarische transiente Änderung der Schwerpunktkurve bei einer quadratischen Profilstruktur unter variierendem Belastungswinkel. Die y-Achse im globalen Koordinatensystem stimmt dabei mit der von der Heuristik CGB in allen drei Beispielen ermittelten prädominanten Deformationsachse im Graphenkoordinatensystem überein. Koordinatenwerte in mm.

Eine automatische Detektion der Referenzseite wird gegenüber einem zusätzlichen Konfigurationsparameter bevorzugt, da hierdurch die Anwenderfreundlichkeit gesteigert und die Fehleranfälligkeit gesenkt wird. Der Ablauf des Algorithmus zur Detektion der Referenzseite ist in Abbildung 5–26 dargestellt. Für die Bestimmung der Referenzseite werden jeweils die äußeren 10% der Punkte der Schwerpunktkurve an jedem Ende betrachtet. Der Wert ist dabei für typische Crashstrukturen ein geeigneter Kompromiss aus einer Fokussierung des lokalen Koordinatensystems auf das Profilende und der Möglichkeit zum Filtern lokaler Effekte wie beispielsweise Deformationen, Triggermechanismen oder abgeschnittene Profilenden.

Über den äußersten Punkt und den Mittelpunkt der ausgewählten Schwerpunkte der Schwerpunktkurve werden eine lokale z -Achse und anschließend die Abweichung der ausgewählten Schwerpunkte von dieser Achse berechnet (vgl. Abbildung 5–25). Über einen Faktor werden hohe Kompressionen am Profilende mit einem Penaltyfaktor (Bestrafungsterm) versehen, da aufgrund der Kompression üblicherweise kleinere Abweichungen auftreten. Die Wahl der Referenzseite erfolgt dann auf Basis der berechneten Indizes für beide Profilenden (vgl. Abbildung 5–26).

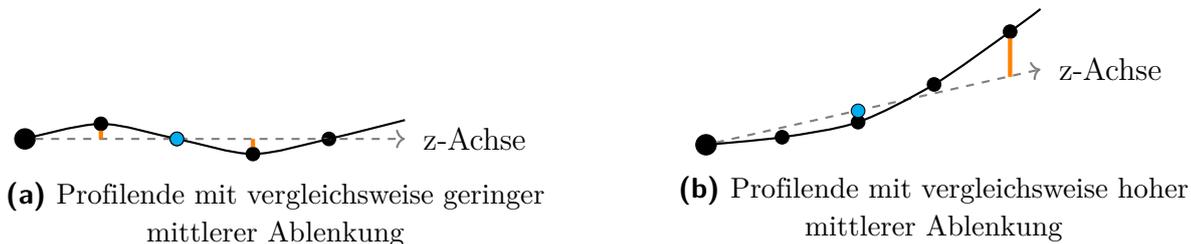


Abbildung 5–25: Beispiele für Schwerpunktkurven an einem Profilende mit unterschiedlicher mittlerer Ablenkung (blauer Punkt ist mittlere Position der äußeren Schwerpunkte; orange Linie ist Ablenkung von lokaler z -Achse) (modifiziert aus Masterarbeit von Enrique Benavides Banda (vgl. Anhang A))

Nach der Ermittlung der Referenzseite wird dort für jeden Zeitschritt das lokale Koordinatensystem der Profilstruktur bestimmt. Da der Ursprung des lokalen Koordinatensystems im Profilende der Referenzseite liegt, wird dieses folglich mit der Profilstruktur in allen Zeitschritten mitgeführt. Die z -Achse zeigt dabei in die Richtung der lokalen z -Achse aus der Bestimmung der Referenzseite und somit in Extrusionsrichtung. Um die Deformations- bzw. Biegerichtung der Struktur mit der Querschnittsrepräsentation durch den Graphen zu verknüpfen, werden zusätzlich die x - und y -Achsen des lokalen Koordinatensystems derart angeordnet, dass sie mit dem Graphenkoordinatensystem übereinstimmen. Die Orientierung des Graphenkoordinatensystems an der Referenzseite wird über eine Analyse des

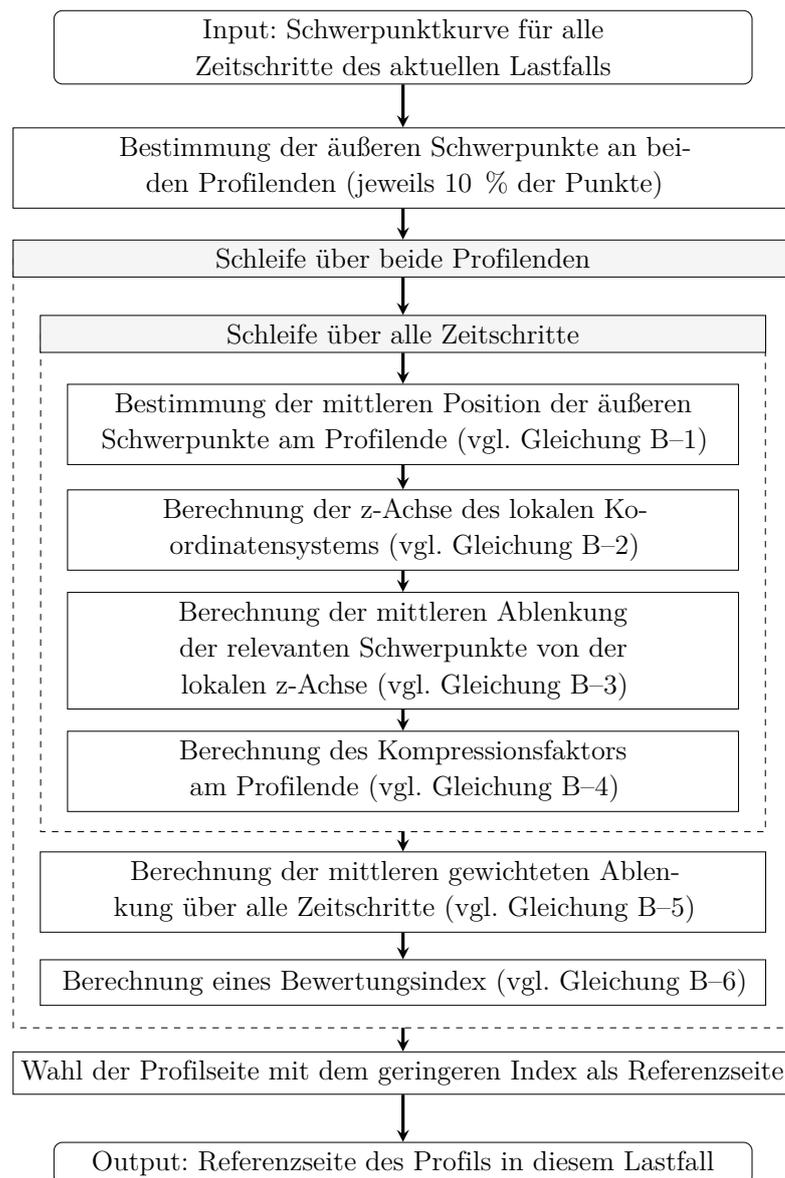
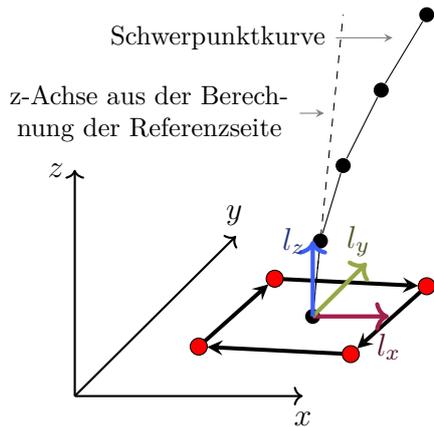


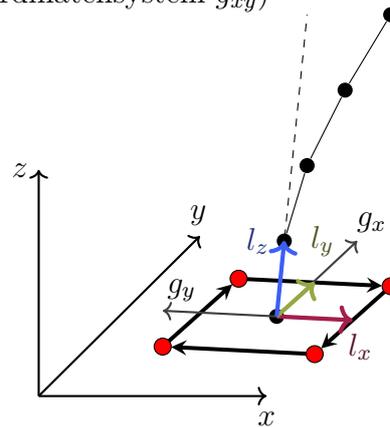
Abbildung 5–26: Ablaufdiagramm zur Bestimmung der Referenzseite in der Heuristik *Counter Global Bending* (modifiziert aus Masterarbeit von Enrique Benavides Banda (vgl. Anhang A))

FE-Modell bestimmt. Dabei kann jedem Finiten Element jeweils eine Kante im Graphen zugeordnet werden. Über FE-Knoten, welche Teil mindestens zweier Finiten Elemente unterschiedlicher Kanten sind, kann auf die Position der LINK-Knoten geschlossen werden. Die z-Achse aus der Bestimmung der Referenzseite steht dabei senkrecht auf dem Graphenkoordinatensystem. Abbildung 5–27 zeigt das Erstellen des lokalen Koordinatensystems schematisch für einen exemplarischen Zeitschritt.

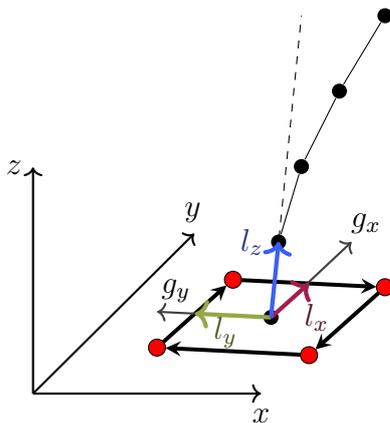
1. Erstellen eines lokalen Koordinatensystems l_{xyz} mit dem Ursprung am Ende der Referenzseite des Profils



2. Ausrichten der z-Achse des lokalen Koordinatensystems an die z-Achse aus der Berechnung der Referenzseite (steht senkrecht auf Graphenkoordinatensystem g_{xy})



3. Rotation der x- und y-Achse des lokalen Koordinatensystems bis zur Übereinstimmung mit Graphenkoordinatensystem g_{xy}



4. Berechnung der Richtungsvektoren zwischen der z-Achse und der Schwerpunktkurve

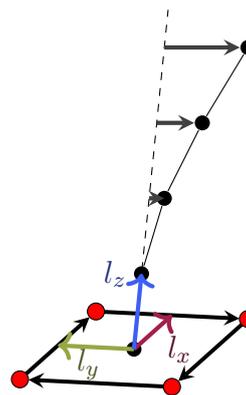


Abbildung 5–27: Schematische Darstellung der Bestimmung des lokalen Koordinatensystems und der Richtungsvektoren in der Heuristik *Counter Global Bending* in einem exemplarischen Zeitschritt (modifiziert aus Masterarbeit von Enrique Benavides Banda (vgl. Anhang A))

Für die Bestimmung der prädominanten Deformationsachse im Graphenkoordinatensystem werden zunächst die Richtungsvektoren zwischen der z -Achse und der Schwerpunktkurve für jeden Zeitschritt in jedem Lastfall bestimmt (vgl. Abbildung 5–27 4.). Diese werden anschließend auf die jeweilige Graphenebene projiziert und daraus die gemittelte Deformationsrichtung als Vektor in der Graphenebene für jeden Zeitschritt in jedem Lastfall ermittelt (vgl. Abbildung 5–28).

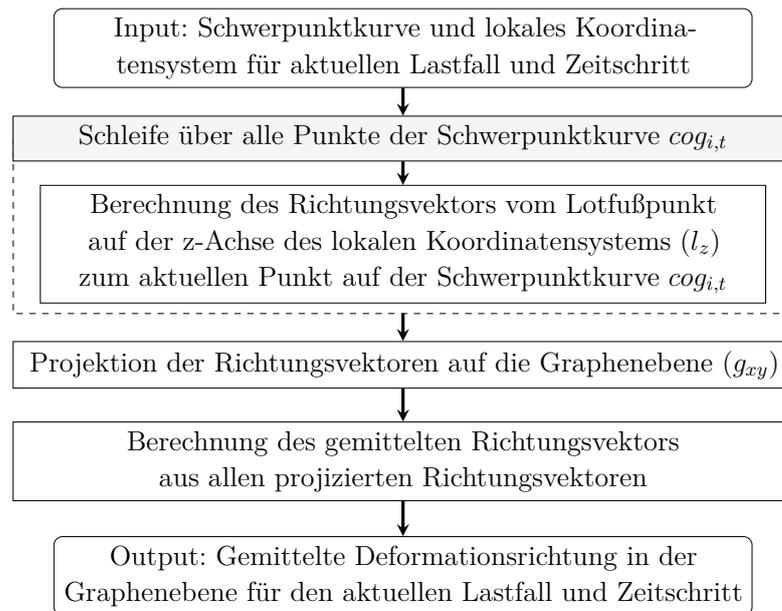


Abbildung 5–28: Ablaufdiagramm zur Bestimmung der gemittelten Deformationsrichtung in der Heuristik *Counter Global Bending* (modifiziert aus Masterarbeit von Enrique Benavides Banda (vgl. Anhang A))

Dem in Abbildung 5–23 dargestellten Ablaufdiagramm folgend, wird aus den gemittelten Deformationsrichtungen eines Lastfalls jeweils die maximale gemittelte Deformationsrichtung (als Vektor in der Graphenebene) berechnet. Abschließend erfolgt die Bestimmung der jeweils maximal auftretenden Deformationen in x - und y -Richtung des Graphenkoordinatensystems über alle Lastfälle. Die Achse mit der betragsmäßig größten Auslenkung ist die prädominante Deformationsachse im Graphenkoordinatensystem (mit Deformationsrichtung auf der Achse), auf welche sich die im folgenden Abschnitt vorgestellten Maßnahmen beziehen.

Ermittlung geeigneter topologischer Maßnahmen

Die Ermittlung geeigneter topologischer Maßnahmen zur robusten Initiierung und Aufrechterhaltung von Faltenbeulen ist herausfordernd, da die Mechanismen, welche zu einem Biegekollaps von Profilstrukturen führen, komplex sind. Diese können

für einzelne Strukturen unter definierten Randbedingungen oftmals nachvollzogen werden. Die Übertragung auf andere Querschnittsgeometrien, Materialien oder Lastfälle führt jedoch häufig zu inkonsistenten Ergebnissen. Teilweise reichen kleine Unterschiede bei schräg belasteten Profilstrukturen im Grenzbereich zwischen Faltenbeulen und globaler Biegung aus, um an einem Verzweigungspunkt ein zunächst geringfügig anderes Deformationsverhalten zu initiieren und in der Folge in unterschiedlichen Deformationsformen zu deformieren.

Untersuchungen in der Literatur zum Verhalten von Profilstrukturen unter schräger Belastung werden meist mit einfachen, unveränderlichen Topologien durchgeführt und ohne das Ziel, Topologien zu finden, welche bei großen Impaktorneigungswinkeln robust gegen globale Biegung wirken (Han und Park 1999; Reyes et al. 2002; Reyes et al. 2003; Tarlochan et al. 2013). Fang et al. (2015) stellen jedoch fest, dass Mehrkammer-Profile mit steigender Kammeranzahl ein besseres Energieabsorptionsvermögen aufweisen, im Hinblick auf schräge Belastung aber weniger robust gegenüber globaler Biegung sind. Die Untersuchungen beziehen sich dabei auf regelmäßige Mehrkammer-Profile (vgl. Abschnitt 2.2.2). Sun et al. (2018) stellen auf Basis von Optimierungen zudem fest, dass die Wanddicken der äußeren Wände von höherer Bedeutung für die Stabilität von Profilstrukturen unter schräger Belastung sind, als die Wanddicken der inneren Wände bei Mehrkammer-Profilen. Eine größere Wanddicke der äußeren Wände im Verhältnis zu den inneren Wänden verbessert hierbei das Strukturverhalten. Untersuchungen von Alavi Nia et al. (2012) zeigen, dass Trigger (in diesem Fall Eckausschnitte) die Widerstandskraft gegen globale Biegung verbessern können, falls sie an einer geeigneten Stelle eingebracht werden.

Für eine Verwendung in der Heuristik lassen sich daraus, mit Ausnahme der Feststellungen aus (Fang et al. 2015), keine topologischen Maßnahmen für die Verbesserung der Initiierung und Aufrechterhaltung von Faltenbeulen ableiten. Aufgrund der Heuristiken *Delete Needless Wall* und *Remove Small Chambers* sind topologische Maßnahmen, bei welchen innere Wände entfernt werden, bereits im GHT-Ablauf vorhanden. Die Erkenntnisse aus (Sun et al. 2018) zu den Wanddickenverhältnissen der äußeren und inneren Wände können zudem als Motivation für eine nachgeschaltete Dimensionierung dienen, jedoch nicht als Basis für die Entwicklung von topologischen Maßnahmen. Die in (Alavi Nia et al. 2012) vorgeschlagene Triggereinbringung wird implizit durch die Heuristik *Enforce Deformation Start Point* und eine anschließende Optimierung der Triggerpositionen im Ablauf der GHT ermöglicht.

Um geeignete topologische Maßnahmen zu finden, werden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt (vgl. Masterarbeit von Enrique Benavides Banda (Anhang A)). Ziel ist es, basierend auf empirischen Beobachtungen, generelle Eigenschaften von tendenziell stabileren Profilstrukturen zu finden und diese in topologische Maßnahmen für die Heuristik zu transferieren. Die abgeleiteten Maßnahmen müssen dabei nicht in allen Fällen zu Verbesserungen führen. Jedoch sollen sie sinnvolle Querschnittstopologien erzeugen, welche hinsichtlich der Robustheit der Strukturen gegen globale Biegung besser als zufällige Modifikationen wirken. Neben dieser Eigenschaft sollen die abgeleiteten Maßnahmen zudem die Entwurfsraumabtastung der Methode verbessern.

Um Zusammenhänge ableiten zu können, wird für die Untersuchungen der Fallturm-Lastfall (vgl. Abbildung 2–10) als einfacher Komponentenversuch ausgewählt. Der Impaktor-neigungswinkel wird dabei im Grenzbereich zwischen Faltenbeulen und globaler Biegung gewählt. Um eine Vielzahl an unterschiedlichen Topologien zu untersuchen, werden Optimierungen mit der GHT und 25 unterschiedlichen Startentwürfen herangezogen. Dazu zählen quadratische und rechteckige Einkammerprofile ebenso wie symmetrische und asymmetrische Mehrkammer-Strukturen sowie ausgefallenerere Außengeometrien wie L-Formen. Zusätzlich werden verschiedene Symmetrie-Restriktionen aktiviert. Für die Untersuchungen schreitet die GHT lediglich eine Iteration voran. Dabei können alle bestehenden Heuristiken jeweils einen Topologievorschlag machen, welcher wiederum mit einem Funktionsaufruf evaluiert wird.

Die Untersuchungen zeigen, dass Entwürfe, welche eine Symmetrie hinsichtlich der prädominanten Deformationsachse im Graphenkoordinatensystem besitzen, vergleichsweise häufiger mittels Faltenbeulen deformieren als Entwürfe, welche keine Symmetrie oder eine Symmetrie hinsichtlich der jeweils anderen Graphenachse besitzen. Ursächlich hierfür könnte sein, dass diese Symmetrie zu einer gleichmäßigeren Strukturbelastung führt und dadurch dem Ausbilden von lokalen Instabilitäten und Fließgelenken entgegenwirkt. Zudem zeigt sich, dass Entwürfe, deren Graphen über V- und Y-Unterstützungen (vgl. Abbildung 5–29) verfügen, ebenfalls überdurchschnittlich häufig Faltenbeulen anstelle von globaler Biegung aufweisen. Diese Tendenz kann insbesondere für Entwürfe festgestellt werden, bei denen die dem Impaktor abgewandte Seite durch diese Maßnahmen abgestützt wird. Ursächlich hierfür ist, dass durch diese Maßnahmen tendenziell der Entstehung von Fließgelenken entgegengewirkt werden kann. Aus den Untersuchungen können in der Folge drei Heuristikvarianten abgeleitet werden, welche tendenziell zu einer größeren Robustheit gegen globale Biegung führen:

1. Symmetrie hinsichtlich der prädominanten Deformationsachse im Graphenkoordinatensystem zum Erzeugen einer gleichmäßigeren Strukturbelastung
2. V-Unterstützungen der Außenwände hinsichtlich der prädominanten Deformationsachse im Graphenkoordinatensystem, um der Entstehung von Fließgelenken entgegenzuwirken
3. Y-Unterstützungen der Außenwände hinsichtlich der prädominanten Deformationsachse im Graphenkoordinatensystem, um der Entstehung von Fließgelenken entgegenzuwirken

Diese drei Heuristikvarianten sind schematisch in Abbildung 5–29 dargestellt und werden in den folgenden Abschnitten näher erörtert.

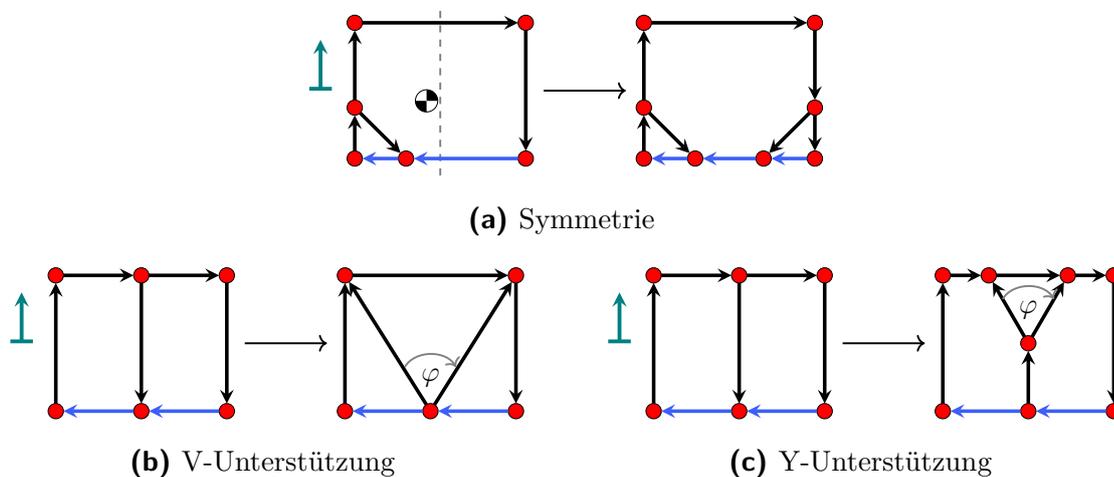


Abbildung 5–29: Schematische Darstellung der topologischen Maßnahmen der Heuristik *Counter Global Bending*; die ermittelte prädominante Deformationsachse (grüner Pfeil) steht in diesen Beispielen orthogonal auf der zuerst impaktierten Seite bei einer schrägen Belastung (vgl. Abbildung 2–10) - blaue Kanten im Graphen)

Maßnahme 1: Symmetrie (CGB Symmetry)

Durch das gezielte Einbringen von Symmetrie soll eine gleichmäßigere Krafteinleitung und Verteilung innerhalb der Profilstruktur erzeugt werden, welche sich positiv auf die Stabilität von Faltenbeulen auswirken kann. Zudem wirkt das Erzwingen von Symmetrie einseitigen Versteifungen entgegen. Als Symmetrieachse im Profilquerschnitt wird dabei die Achse des Graphenkoordinatensystems genutzt, welche in der vorangegangenen Detektion als die prädominante Deformationsachse im Graphenkoordinatensystem ermittelt wurde. Vom standardmäßigen Erzwingen von Symmetrie als zusätzliche Restriktion für alle Optimierungen wird abgesehen,

da hier der Anwender die Wahl der Symmetrieachse(n) vor Optimierungsbeginn treffen müsste und zusätzlich der Entwurfsraum erheblich eingeschränkt werden würde. Weiter ist das Aufprägen von Symmetrie zum Erhöhen des Widerstands gegen globale Biegung nicht in jedem Fall vorteilhaft. Um eine bessere Entwurfsraumabtastung zu erreichen, ist folglich ein zusätzliches Einbringen von symmetrischen Entwürfen in die konkurrierenden (häufig asymmetrischen) Entwürfe der anderen Heuristiken zielführend.

Abbildung 5–30 zeigt den Ablauf der Heuristikvariante zur Einbringung von Symmetrie. Nach der Wahl der Symmetrieachse im Graphenkoordinatensystem prüft die Heuristikvariante, ob der Elternentwurf bereits symmetrisch hinsichtlich der gewählten Symmetrieachse ist und folglich keine Topologiemodifikation durchgeführt werden kann. Ist der Elternentwurf asymmetrisch, wird zudem überprüft, ob die äußeren Kanten des Graphen symmetrisch hinsichtlich der gewählten Achse sind. Da die Außengeometrie der GHT nicht verändert werden darf, ist die Symmetrie der Außengeometrie Voraussetzung für ein Erzwingen von Symmetrie der Innengeometrie.

Es folgt die Auswahl der Seite, welche an der Symmetrieachse gespiegelt werden soll. Ziel ist es dabei diejenige Seite auszuwählen, welche über mehr innere Struktur (und folglich üblicherweise über mehr bzw. längere Kanten) verfügt. Hierfür wird der Schwerpunkt des Elternentwurfs in der Graphenebene bestimmt. Liegt der Schwerpunkt außerhalb der Symmetrieachse, wird die Seite gewählt, auf welcher der Schwerpunkt ermittelt wurde. Liegt der Schwerpunkt hingegen auf der Symmetrieachse, werden beide Entwürfe generiert. Es wird derjenige Entwurf ausgewählt, bei dem der Schwerpunkt näher an der impaktierten Seite liegt. Abschließend werden die Fertigungsrestriktionen überprüft.

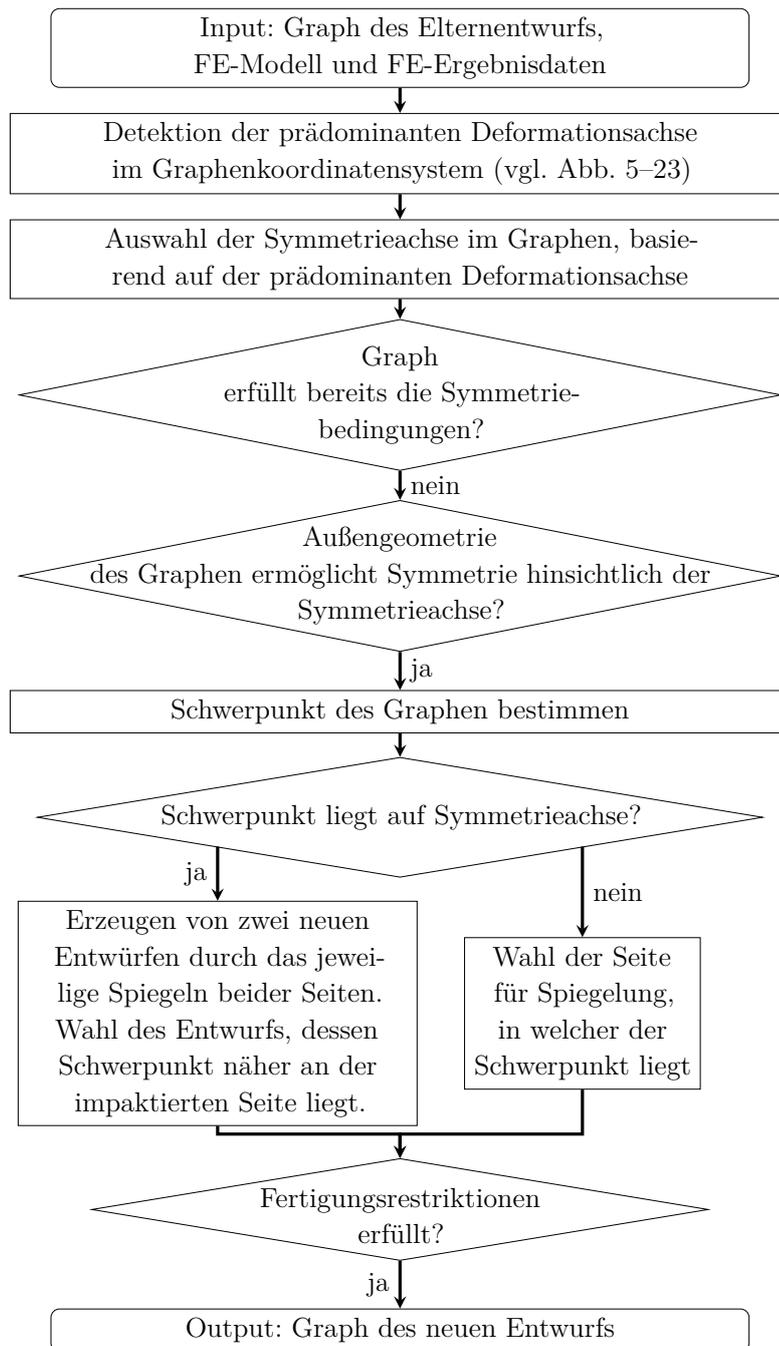


Abbildung 5–30: Ablaufdiagramm der Heuristikvariante zum Einbringen von Symmetrie der Heuristik *Counter Global Bending* (modifiziert aus Masterarbeit von Enrique Benavides Banda (vgl. Anhang A))

Maßnahme 2: V-Unterstützung (CGB V-Support)

Der Ablauf zum Einbringen von V-Unterstützungen ist in Abbildung 5–31 dargestellt. Ziel dieser Heuristikvariante ist es die Steifigkeit der Profilecken durch

eine zusätzliche Wand zu erhöhen. Somit wird dem Entstehen von lokalen Fließgelenken an diesen Ecken, welche für die Deformation mittels globaler Biegung notwendig sind, entgegen gewirkt. Durch das Aufteilen einer bestehenden Wand entstehen zudem zwei längere Wände, welche tendenziell die Nachgiebigkeit der Struktur erhöhen. Die Entwürfe dieser Heuristik stehen somit in Konkurrenz zu den Entwürfen der anderen, meist versteifend wirkenden Heuristiken.

$$Index_{prio} = l_{edge} v_{cog,def} \quad (5-10)$$

mit

$Index_{prio}$ Index für Priorisierung der Kanten

l_{edge} Länge der Kante

$v_{cog,def}$ Komponente des Vektors zwischen dem Schwerpunkt der Kante und dem Schwerpunkt der Außengeometrie des Graphen, welcher in Richtung der gemittelten Deformationsrichtung zeigt

Nach der Bestimmung der prädominanten Deformationsachse ermittelt die Heuristikvariante alle Kanten im Graphen, die in Richtung dieser Achse zeigen. Um die Anzahl der potenziellen Kanten zu erhöhen, wird eine Toleranz von $\pm 5^\circ$ auf diese Richtung eingeführt. Die Liste der Kandidatenkanten wird absteigend nach einem Prioritätsindex (vgl. Gleichung 5–10) sortiert.

Durch diese Maßnahme werden lange Kanten in der Nähe der Außengeometrie des Graphen priorisiert, da diese eine höhere Chance haben, die äußeren Kanten bzw. LINK-Knoten zu unterstützen. In der anschließenden Schleife über die sortierten Kanten wird zunächst der LINK-Knoten der jeweiligen Kante gesucht, an welchem die Aufteilung durchgeführt werden soll. Dabei wird derjenige Knoten gewählt, welcher weiter von der impaktierten Seite entfernt liegt. Anschließend werden, ausgehend vom zweiten LINK-Knoten der Kante, zwei Geraden mit einem eingeschlossenen Winkel von $\varphi = 60^\circ$ erzeugt, um eine steife, aber dennoch breite Abstützung zu erreichen. Mit Hilfe dieser Geraden werden die Schnittpunkte mit den umliegenden Kanten für das Einbringen der zwei neuen Kanten ermittelt. Die bisherige Wand wird anschließend gelöscht. Erfüllt dieser Entwurf die Fertigungsrestriktionen, wird die Schleife beendet. Andernfalls wird sie wiederholt, bis ein valider Entwurf gefunden wird oder bis keine Kandidatenkanten mehr verfügbar sind.

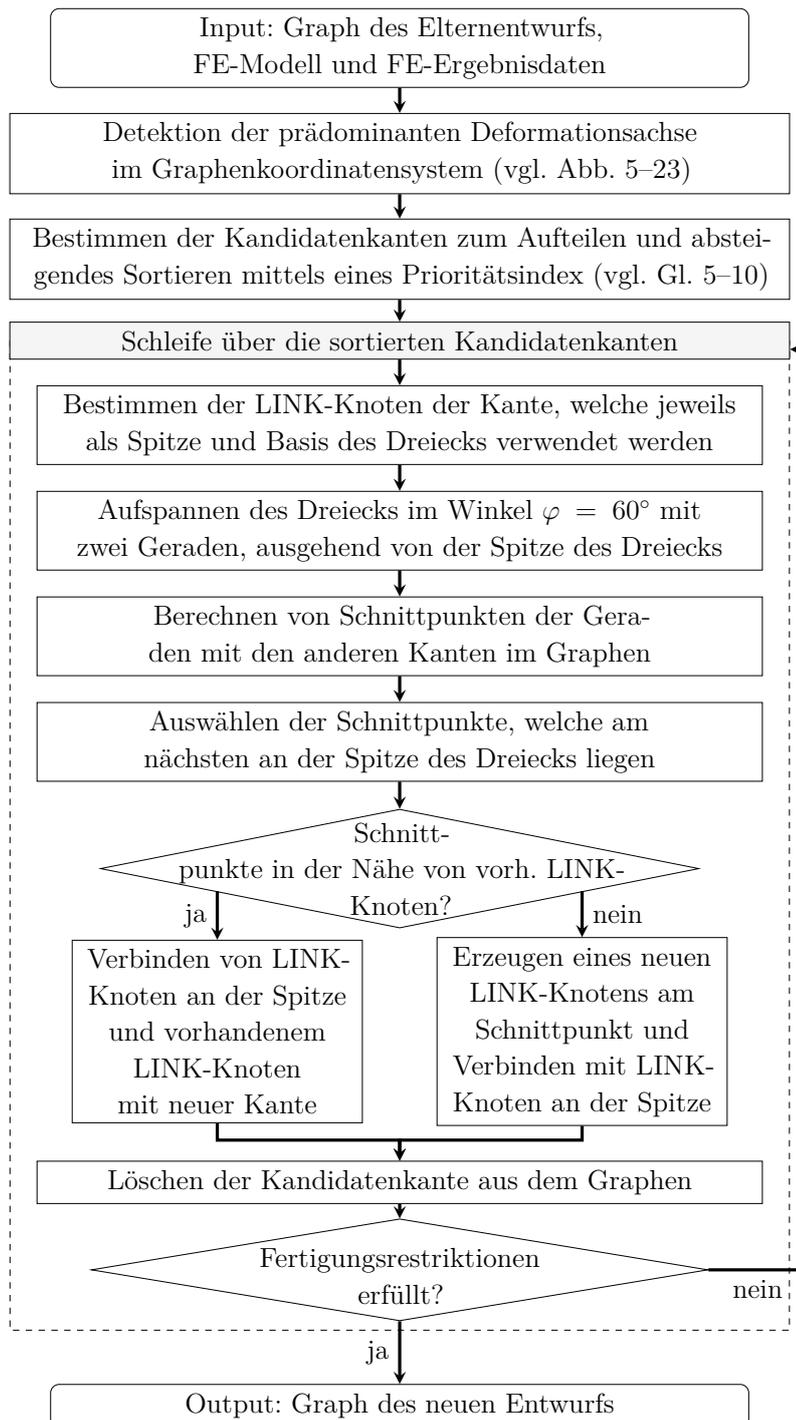


Abbildung 5–31: Ablaufdiagramm der Heuristikvariante zum Einbringen von V-Unterstützungen der Heuristik *Counter Global Bending* (modifiziert aus Masterarbeit von Enrique Benavides Banda (vgl. Anhang A))

Maßnahme 3: Y-Unterstützung (CGB Y-Support)

Der Ablauf der Heuristikvariante zum Einbringen von Y-Unterstützungen (vgl. Abbildung 5–32) ist ähnlich der Variante zum Einbringen von V-Unterstützungen aufgebaut. Das Ziel der Heuristikvariante ist dabei ebenso dem Ausbilden von lokalen Fließgelenken, welche für ein Deformieren mittels globaler Biegung notwendig sind, mit einer Änderung der Querschnittstopologie entgegenzuwirken. Anstelle von V-Unterstützungen werden jedoch Y-Unterstützungen eingebracht. Durch das Reduzieren der Wandlängen und das Einbringen einer kleiner Kammer werden die Energieabsorptionseigenschaften der Profilstruktur jedoch tendenziell erhöht. Im Gegensatz zur V-Unterstützung erfolgt das Abstützen zudem lokaler und fällt dadurch geringer aus. Trotzdem ist die Abstützungswirkung höher als bei einer einfachen Wand. Das Vorgehen zum Einbringen der Y-Unterstützungen erfolgt analog zum Vorgehen bei den V-Unterstützungen. Das Aufteilen der Kante wird jedoch an ihrer Mitte, aber ebenfalls mit einem Winkel von $\varphi = 60^\circ$ durchgeführt. Falls der Entwurf die Fertigungsbedingungen nicht erfüllt, wird die Heuristik mit der nächsten Kandidatenkante fortgesetzt, bis keine Kandidatenkante mehr verfügbar ist.

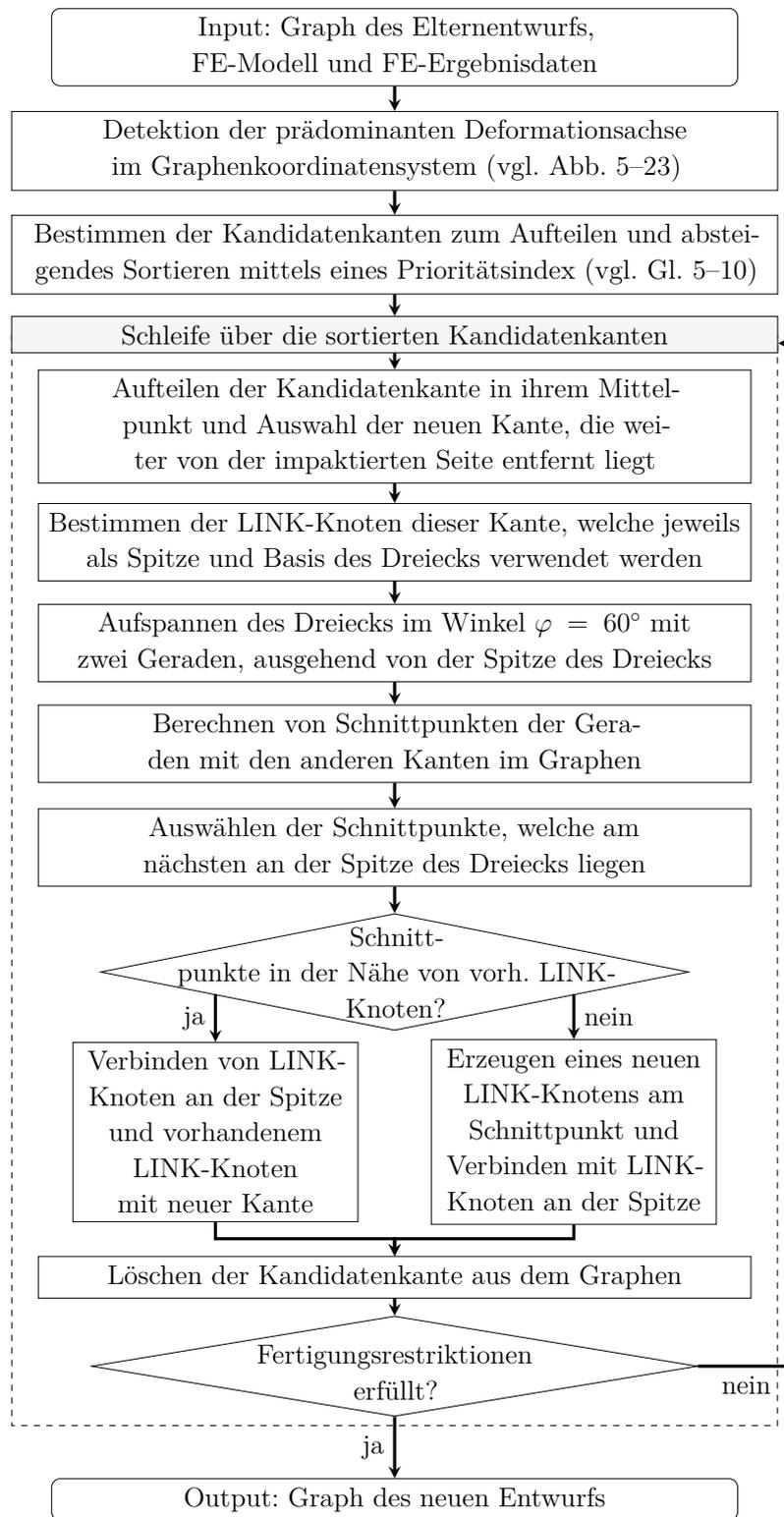


Abbildung 5–32: Ablaufdiagramm der Heuristikvariante zum Einbringen von Y-Unterstützungen der Heuristik *Counter Global Bending* (modifiziert aus Masterarbeit von Enrique Benavides Banda (vgl. Anhang A))

5.4 Integration der neuen Heuristiken in den Optimierungsablauf

Die in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Heuristiken sollen so in den Ablauf der GHT integriert werden, dass sie die GHT erweitern und alle bisherigen Möglichkeiten der GHT erhalten bleiben. Einige der neuen axialen Heuristiken benötigen im Vergleich zu den lateralen Heuristiken zusätzliche Informationen aus dem automatisierten Vernetzungsprozess und den Ergebnisdaten der Crashsimulationen. Da die Berechnung des Splines im Vernetzungsprozess bereits implementiert ist, erhalten die entsprechenden Heuristiken über eine Schnittstelle Zugriff auf diesen Erstellungsprozess und damit auf die Spline-Informationen. Damit die plastischen Dehnungen für die Finiten Elemente der Profilstruktur vom FE-Programm als ASCII-Informationen in eine Ausgabedatei geschrieben werden, müssen diese Daten vom Vernetzungsprogramm über eine entsprechende Ausgabeanforderung in der FE-Eingangsdatei (Include-Datei) der Profilstruktur angefordert werden. Zudem wird die Schnittstelle zum Einlesen der FE-Ergebnisdaten in der GHT erweitert.

Die axialen Heuristiken zur Topologieänderung werden analog der bestehenden Heuristiken zur Topologieänderung in der äußeren Optimierungsschleife aufgerufen. Entsprechend der Heuristik *Create Lattice Structures* unterbreiten Heuristiken, welche ihre Entwürfe auf Basis von geometrischen Betrachtungen des Startentwurfs generieren, ihre Entwürfe erst in einer Iteration, in der die Entwürfe der sukzessive vorgehenden Heuristiken zur Topologieänderung eine ähnliche Topologiekategorie haben. Dieses Vorgehen verbessert die Entwurfsraumabtastung, da den anderen Heuristiken die Möglichkeit gegeben wird, konkurrenzfähige Entwürfe, welche häufig erst in einer höheren Iteration entstehen, zu unterbreiten. Insbesondere beim Optimierungsziel der Massenminimierung ist dieses Vorgehen zudem von Vorteil für die Heuristiken, deren Entwürfe auf dem Startentwurf basieren. Der Grund dafür ist, dass die Strukturmassen der anderen Entwürfe, welche als Ausgangsmasse für die innere Optimierungsschleife genutzt werden, in späteren Iterationen bereits reduziert werden konnten. In der Folge können in der inneren Optimierungsschleife zur Evaluierung neuer Entwürfe oft leichtere Strukturen erzielt werden.

Mit einigen der Heuristiken, welche ihre Vorschläge auf Basis von geometrischen Betrachtungen machen, können über die Variation der Eingangsparameter eine Vielzahl von verschiedenen Querschnittsgeometrien generiert werden. Um die Effizienz der Methode hinsichtlich der Funktionsaufrufe beizubehalten, wird eine maximale Anzahl (Standardwert: 5) für Entwürfe aus dieser Kategorie pro Iteration

sowie eine Priorisierung der entsprechenden Heuristiken (ISC > CBS > CLS > CCS) festgelegt. Die Priorisierung erfolgt auf Basis der aus Literaturergebnissen erwartbaren Energieabsorptionseigenschaften (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Die Heuristiken, welche Trigger einbringen, werden analog der Heuristiken zur Formoptimierung implementiert. Das Aufbringen der Trigger erfolgt zudem für jeden Entwurf von Grund auf neu und kann dadurch an die entsprechende Topologie angepasst werden.

Es ist bekannt, dass Querschnitte mit kleinen Kammern über vergleichsweise gute Energieabsorptionseigenschaften verfügen. In GHT-Optimierungen konnte trotzdem regelmäßig beobachtet werden, dass die Heuristiken zur Topologieänderung in Entwürfen, welche über kleine Kammern und kurze Wände und folglich häufig über gute Energieabsorptionseigenschaften verfügen, lange Wände einbringen. Dabei werden beispielsweise zwei gegenüberliegende Außenwände verbunden. Gerade bei vergleichsweise weit fortgeschrittenen Optimierungen verschlechtern diese Topologiemodifikationen das Strukturverhalten in einer überwiegenden Anzahl der Fälle. Aus diesem Grund wird für das Einbringen neuer Wände eine zusätzliche Restriktion eingeführt, welche nur für die Optimierung axial belasteter Crashstrukturen aktiviert wird. Um auf der einen Seite das Einbringen besonders langer Kanten zu verhindern, aber trotzdem verschiedene Kantenlängen zu ermöglichen, wird das folgende Maß verwendet: Neu in den Graphen eingebrachte Kanten dürfen nicht länger sein als das Zweifache der gemittelten Länge aller inneren Kanten (vgl. Abschnitt 3.1) inklusive der neuen Kante.

6 Anwendung der entwickelten Methodik

In diesem Kapitel soll die Effizienz der vorgestellten Methodik in typischen Anwendungsbereichen aufgezeigt werden. Bei der ersten Anwendung wird die Topologieoptimierung von Profilstrukturen in einem Fallturm-Lastfall untersucht. Dabei wird die Methodik bei einer Vielzahl von Extrusionsprofilen mit unterschiedlichen Außengeometrien und unter variierenden Belastungswinkeln angewendet. Die Profilstrukturen werden von einer starren Impaktorplatte axial bzw. schräg-axial (oblique) crashbelastet. Ziel aller Topologieoptimierungen ist dabei die Minimierung der maximalen Intrusion. Dies entspricht aufgrund des gewählten Optimierungsproblems einer möglichst effizienten Energieabsorption mittels Faltenbeulen. Das Beispiel orientiert sich an zahlreichen experimentellen und numerischen Untersuchungen aus der Literatur (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Bei der zweiten Anwendung handelt es sich um eine typische Ingenieursaufgabe in einem industriellen Simulationsumfeld. In diesem Anwendungsbeispiel soll die Topologie einer Fahrzeugcrashbox in einem Rollbockversuch optimiert werden. Als Zielfunktionen werden dabei die Minimierung der maximalen Kontaktkraft zwischen dem Crash-Management-System und der Barriere sowie die Minimierung der Strukturmasse in einem *RCAR Front Impact* Versicherungslastfall (vgl. Abschnitt 2.1) untersucht.

Alle Optimierungsprozesse werden durch die Software TOC gesteuert. Dabei sind, wenn nicht anders beschrieben, sowohl die bisherigen lateralen als auch die in Kapitel 5 vorgestellten axialen Heuristiken aktiv. Die Generierung der FE-Modelle erfolgt mit der Software GRAMB unter Einbeziehung der in Kapitel 4 vorgestellten Erweiterungen. Alle Funktionsaufrufe (Crashsimulationen) in diesen Anwendungsbeispielen werden mit PAMCRASH v2018 (ESI 2018) durchgeführt.

6.1 Anwendungsbeispiel 1: Fallturm-Lastfall

In dieser Untersuchung werden die Querschnittstopologien verschiedener Aluminiumprofile hinsichtlich einer möglichst effizienten Energieabsorption in einem Fallturm-Lastfall untersucht und optimiert. Als Zielfunktion soll daher die maximal auftretende Intrusion minimiert werden. Neben der initialen Querschnittstopologie werden zudem der Belastungswinkel sowie die Symmetrie-Restriktionen variiert. Innerhalb dieser Untersuchung werden insgesamt 94 Topologieoptimierungen mit der GHT und ca. 18500 Crashesimulationen durchgeführt.

Durch den Vergleich mit in der Literatur als besonders effizient bzw. optimal beschriebenen Profilstrukturen bzw. -querschnittstopologien sollen einzelne Optimierungsergebnisse diskutiert und eingeordnet werden. Durch die hohe Anzahl an Optimierungen sollen zudem allgemeine Zusammenhänge in Bezug auf die Optimierungsergebnisse sowie auf die Optimierungsmethodik abgeleitet und Maßnahmen zur Effizienzsteigerung hinsichtlich der benötigten Anzahl an Funktionsaufrufen diskutiert werden.

6.1.1 Initiale Profilgeometrien (Startentwürfe)

Abbildung 6–1 zeigt die Graphen der untersuchten Profilquerschnitte (Startentwürfe für die Optimierungen). Es werden 9 verschiedene Querschnitte untersucht. Aufgrund der Variation der zuerst crashbelasteten Profilseite in den schräg-axialen Lastfällen sind jedoch 12 Graphen dargestellt. Der hexagonale (hex) und der oktagonale (oct) Querschnitt sind regelmäßig. Die Profillänge in Extrusionsrichtung beträgt immer 400 mm.

Um die unterschiedlichen Außengeometrien besser vergleichen zu können, besitzen alle Startentwürfe eine Masse von 1.2 kg sowie einen einheitlichen Umfang des Profilquerschnitts von 320 mm (Vorgehen in Anlehnung an (Witteman 1999)). Die Startentwürfe besitzen eine identische Wanddicke von 3.4 mm. Insbesondere die Wandlänge und Wanddicke sind bedeutende Einflussfaktoren auf das Faltenbeulen. Durch die einheitliche Wandlänge und Wanddicke der Startentwürfe ergibt sich der Bauraum für die unterschiedlichen Außengeometrien automatisch. Durch die konstante Masse aller Profilstrukturen wird zudem die Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse erleichtert.

Alternativ könnte ein bestimmter Bauraum vorgegeben werden, in dessen Grenzen die unterschiedlichen Querschnittsformen positioniert werden. An dieser Stelle

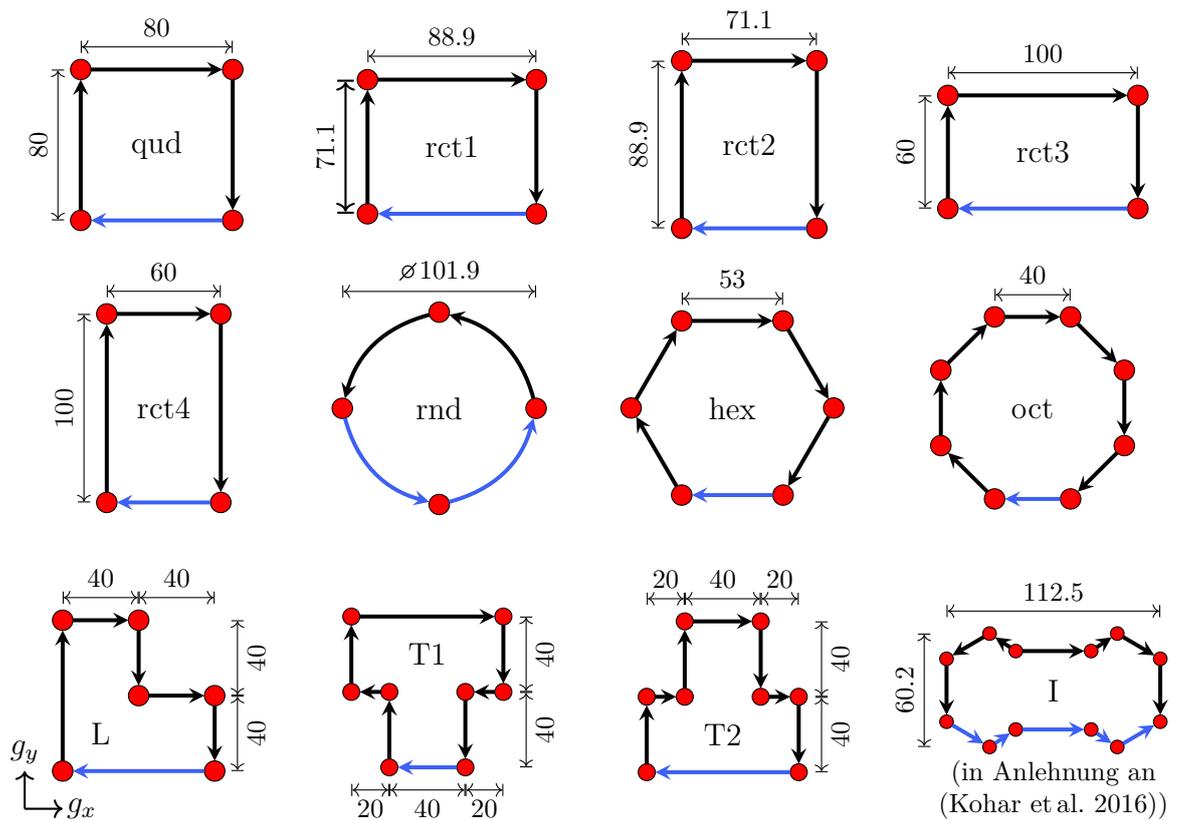


Abbildung 6–1: Initiale Profilquerschnitte für Topologieoptimierungen (die zuerst crashbelastete Seite in Lastfällen mit Impaktorneigung ist blau hervorgehoben; alle Maße in mm)

würde sich die Frage nach einem sinnvollen Bauraum stellen. Wäre beispielsweise ein rechteckiger Bauraum gewählt worden, wie er bei vielen Fahrzeugcrashboxen oder Längsträgern verwendet wird, würde das insbesondere bei Querschnittsgeometrien mit großer Differenz zwischen Länge und Breite im Querschnitt zu großen Differenzen in der Wanddicke und den Wandlängen führen. Unter anderem wäre durch den großen Einfluss der Wanddicke und Wandlänge auf das Faltenbeulen eine Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse erschwert.

Als Material kommt bei den Untersuchungen die Aluminiumlegierung A6XXX T6 mit einer Fließgrenze von $\sigma_f = 280$ MPa zum Einsatz. Die Materialeigenschaften sind in Tabelle 4–2 dargestellt. Abbildung 4–4 zeigt die abschnittsweise linear angenommenen Spannungs-Dehnungs-Kurven für diese Materialien.

6.1.2 FE-Modellbildung und Lastfall

Die Profilstrukturen werden mittels Belytschko–Tsay Schalenelementen mit reduzierter Integration und fünf Integrationspunkten über die Dicke diskretisiert. Die angestrebte Kantenlänge (Zielkantenlänge) für die Finiten Elemente der Profile beträgt 5 mm. Das Material wird über ein elasto-plastisches Materialmodell mit einem Hill-Stören-Rice-Versagensmodell (HSR, vgl. (ESI 2018; Hill 1952; Stören und Rice 1975)) abgebildet. Für den plastischen Bereich wird ein abschnittsweise linearer Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen angenommen.

Der Lastfall ist in Abbildung 6–2 schematisch dargestellt. Der Impaktor ist als Starrkörper modelliert und besitzt eine Masse von 500 kg sowie eine initiale Geschwindigkeit von $v_{Imp,0} = 10 \frac{m}{s}$. Der Neigungswinkel des Impaktors wird zwischen 0° und 20° in 5° -Schritten variiert. Er ist in z-Richtung geführt. Das Extrusionsprofil ist an der Stoß-abgewandten Seite fest eingespannt, d.h. alle translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade sind gesperrt. Am Kontakt zwischen Impaktorplatte und Profilstruktur wird ein Reibwert von $\mu = 0.2$ angenommen. Als Kraft wird die maximale Kontaktkraft zwischen Impaktor und Profilstruktur ausgewertet. Die Intrusion wird über die z-Verschiebung des Impaktors bestimmt.

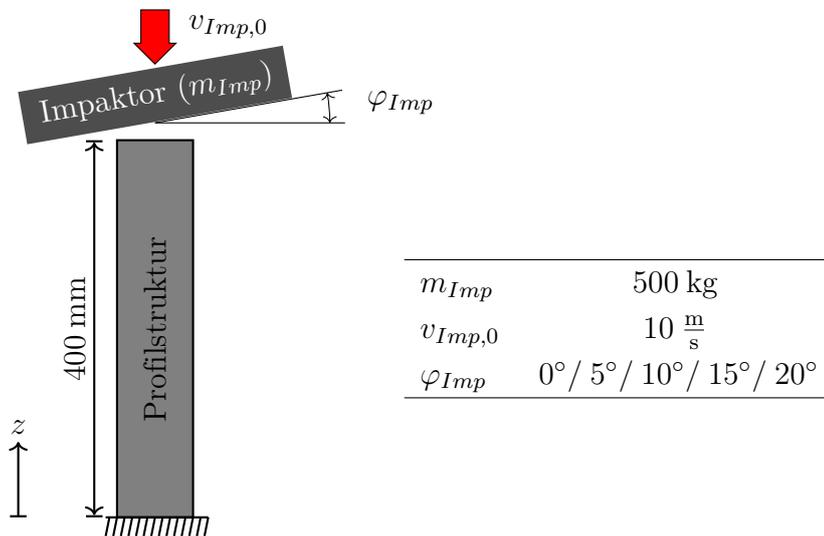


Abbildung 6–2: Schematische Darstellung des Fallturmlastfalls

Die Untersuchungen in Sperber et al. 2021 haben gezeigt, dass eine Berücksichtigung von geometrischen Details wie Verrundungen an Profilkanten sowie das Modellieren von Materialansammlungen an Profilknoten einen signifikanten Einfluss auf das Simulationsergebnis haben können. Daher werden sie in dieser Untersuchung berücksichtigt. Die Verrundungen werden mit einer Bogenlänge von 10 mm

auf den Graphen aufgebracht. Für die Materialansammlungen wird ein Radius von 3 mm gewählt (vgl. Abschnitt 4.2).

Um einen einheitlichen Startpunkt für die Deformationen zu erreichen und um Verzweigungsproblemen (vgl. Abschnitt 2.1.3) entgegenzuwirken, wird bei jedem Profil eine Anfasung (vgl. Abschnitt 4.3.3) am oberen, crashbelasteten Profilende aufgebracht. Diese besitzt eine relative Tiefe von 5 %. Für die Strukturen T1, T2 und I (vgl. Abbildung 6–1) wird diese bei 0° Impaktorneigungswinkel auf 20 % erhöht, da es sonst, insbesondere bei Topologievorschlägen der Heuristiken mit einer hohen axialen Steifigkeit, vor dem Ausbilden der ersten Faltenbeulen zu einer signifikanten initialen plastischen Kompression der Profile kommen kann (vgl. Abschnitt 2.2.1 bzw. (Andrews et al. 1983)).

6.1.3 Optimierungsaufgabe

Bei der Untersuchung von axial belasteten Profilen, welche Energie durch Faltenbeulen absorbieren, sind die spezifische Energieabsorption (SEA, Gleichung 2–11) sowie die Crush Force Efficiency (CFE, Gleichung 2–12) bedeutsame Kennwerte und im Falle einer Strukturoptimierungen oft die gewählte Zielfunktion. Da in dieser Untersuchung jedoch die kinetische Energie von den meisten Strukturen nahezu komplett mittels Faltenbeulen absorbiert wird und ebenso die Masse für alle Strukturen nahezu identisch ist, kann die SEA (Quotient aus absorbierter Energie und Masse) nicht als Vergleichswert herangezogen werden. Die CFE hingegen setzt sich aus der mittleren Kraft und der maximalen Kraft zusammen. Für Profile, die unter einem Winkel von 0° axial belastet werden, gibt es für die maximale Kraft (welche in der Regel durch die initiale Kraftspitze bestimmt wird) aufgrund der ebenfalls nahezu identischen Querschnittsfläche nur geringe Unterschiede (vgl. Abschnitt 2.2.1). Unter schräger Belastung kann es hingegen vorkommen, dass sich die maximale und mittlere Kraft nur geringfügig unterscheiden, die CFE folglich nahe 1 liegt, das Kraftniveau jedoch auf einem niedrigen Niveau liegt und somit hohe Intrusionen auftreten. Daher ist die CFE für diese Untersuchung ebenfalls nicht geeignet.

Für die absorbierte Energie des Profils gilt in Näherung $U_{abs} = F_{avg} \cdot d_{max}$. Folglich können bei konstanter absorbierter Energie die Minimierung der maximalen Intrusion d_{max} sowie die Maximierung der mittleren Kraft als Kennzahlen für die Maximierung der Effizienz der Struktur verwendet werden. Für die Optimierung wird die Minimierung der maximalen Intrusion als Zielfunktion definiert, da eine hohe Intrusion ($d_{max} \approx l_{Profil}$ oder $d_{max} > l_{Profil}$) ein starkes Indiz für ein

Auftreten von globaler Biegung ist und dieser Zusammenhang aus der mittleren Kraft nicht direkt ablesbar ist. Aufgrund der konstanten Masse der Entwürfe können in der GHT alle Vorschläge der Heuristiken mit jeweils einem einzelnen Funktionsaufruf bewertet werden (vgl. Abschnitt 3.3.2). Die Formulierung der Optimierungsaufgabe ist in Tabelle 6–1 dargestellt. Als Abbruchkriterium für die Optimierung werden drei Iterationen ohne Verbesserung der Zielfunktion verwendet.

Tabelle 6–1: Anwendungsbeispiel 1: Definition der Optimierungsaufgabe

Optimierungsziel	Minimierung der maximalen Impaktor-Intrusion
Funktionale Restriktion	Masse ≤ 1.201 kg
Fertigungsrestriktionen	$1.6 \text{ mm} \leq \text{Wanddicke} \leq 5.0 \text{ mm}$
	Verbindungswinkel zwischen zwei Wänden $\geq 15^\circ$
	Abstand zwischen zwei Wänden $\geq 10 \text{ mm}$
Symmetrie-Restriktion	Symmetrie-Restriktionen (x-Achse, y-Achse, Punktsymmetrie) werden für $\varphi_{Imp} = 0^\circ$ untersucht

Als Zielmasse wird für alle Strukturen 1.2 kg gewählt. Die Wahl dieser Masse erlaubt unter Einhaltung der Fertigungsrestriktionen (minimale bzw. maximale Wanddicke) vielfältige Topologiemodifikationen durch die Heuristiken. Die Zielmasse wird durch ein Skalieren der Wanddicken im Graphen (vgl. Abschnitt 3.2.2) sowie ein weiteres Skalieren der FE-Elementdicken nach dem Aufbringen der Materialansammlungen (vgl. Abschnitt 4.2.2) ermöglicht. Um numerische Ungenauigkeiten beim Skalieren zu kompensieren wird eine geringe Toleranz (0.001 kg) auf die Massenrestriktion gegeben. Für den Fall, dass die Wanddicken durch das Skalieren unter die kleinste erlaubte Wanddicke fallen, werden die Wanddicken auf die kleinste erlaubte Wanddicke gesetzt. In der Folge verletzt der entsprechende Entwurf die Restriktion der maximalen Masse. Die Fertigungsrestriktionen sind (Ortmann 2015) entnommen.

Unterschiedliche Außengeometrien und Topologien erfordern speziell angepasste Trigger, da nicht jeder Trigger gleich gut auf jede Struktur aufgebracht werden kann bzw. einen vergleichbaren Effekt hat. Um eine Vergleichbarkeit der Strukturen untereinander, aber auch mit Literaturergebnissen zu ermöglichen, wird die Triggerheuristik *EDSP* (vgl. Abschnitt 5.3.2) in dieser Untersuchung deaktiviert.

Auf eine finale Dimensionierung und Formoptimierung wird in dieser Untersuchung aufgrund der zusätzlich benötigten Funktionsaufrufe verzichtet. Alle Entwürfe haben somit jeweils eine einheitliche Wanddicke. Weitere Verbesserungen der

Zielfunktionen durch eine umfangreiche Dimensionierung und Formoptimierung sind jedoch wahrscheinlich.

6.1.4 Diskussion exemplarischer Optimierungsergebnisse

In diesem Abschnitt werden vier verschiedene Optimierungsergebnisse der GHT exemplarisch vorgestellt. Gegenstand der ersten beiden Untersuchungen ist eine quadratische bzw. rechteckige Struktur unter axialer Belastung bzw. schräg-axialer Belastung. Die dritte Untersuchung (T-Profil) zeigt das beste Ergebnis hinsichtlich der Zielfunktion aller Topologien unter axialer Belastung (0°). Die vierte exemplarische Untersuchung (I-Profil) ist hingegen ein Vergleich mit einem Profilquerschnitt aus der Literatur unter axialer Belastung (0°). Die abgebildeten Graphen stellen die Querschnittstopologien jeweils ohne Verrundungen dar.

Quadratisches Profil (qud) - 0° - keine Symmetrie-Restriktion

Der quadratische Profilquerschnitt ist in der Literatur häufig Gegenstand von experimentellen und numerischen Untersuchungen sowie (Topologie-)Optimierungen. Besonders hervorzuheben ist hierbei die Arbeit von Kim (2002), welche eine effiziente Topologie vorschlägt (vgl. Abschnitt 2.2.2). Diese Topologie wird in vielen Arbeiten als Vergleichs- bzw. Referenzstruktur herangezogen. Zudem basiert die Idee der Heuristik *Insert Small Chambers* (ISC, vgl. Abschnitt 5.2.5) auf dem Ansatz, kleine quadratische Kammern in die Ecken des Profilquerschnitts einzubringen. Der Topologievorschlag dieser Heuristik wird in diesem Abschnitt als Referenzstruktur herangezogen.

Abbildung 6–3 zeigt die Kraft-Weg-Verläufe für den Startentwurf, den Entwurf der Heuristik *Insert Small Chambers* sowie den finalen Entwurf der GHT. Zudem sind die Graphen der Entwürfe visualisiert und die maximalen Intrusionen angegeben. Der Startentwurf zeigt zu Beginn des Faltenbeulens eine extensionale Deformationsform. In einem realen Versuch würde diese Struktur vermutlich eine höhere Intrusion aufweisen (vgl. Abschnitt 2.2.1).

Die Topologie der Heuristik ISC zeigt einen guten Kraft-Weg-Verlauf mit einer maximalen Intrusion von 116.4 mm. Innerhalb dieser Optimierung konnten 20 Topologien mit einem besseren Intrusionswert gefunden werden. All diese Topologien sind durch ein- oder mehrmalige Modifikation der ISC-Topologie durch andere Heuristiken entstanden. Der finale Entwurf der GHT weist einen Intrusionswert

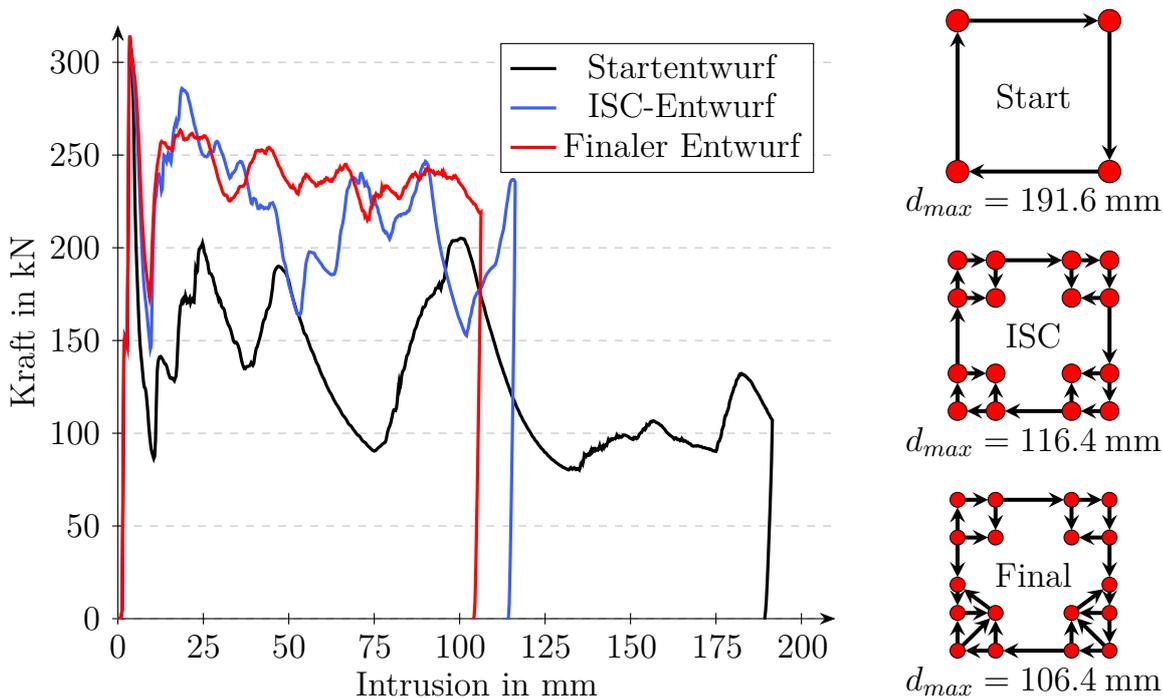


Abbildung 6-3: Kontaktkraft-Intrusions-Kurven für ausgewählte Entwürfe (quadratisches Profil (qud), 0° , keine Symmetrie-Restriktionen)

von 106.4 mm (-8.6% im Vergleich zu ISC) auf. Als ursächlich für den besseren Intrusionswert können das Zusammenspiel der Materialansammlungen an den beiden inneren Profilknoten im unteren Bereich der Graphen in Abbildung 6-3 in Kombination mit den unterschiedlichen Kammergrößen bzw. Wandlängen identifiziert werden. Diese führen zu einem gleichmäßigen Kraft-Weg-Verlauf auf konstant hohem Kraftniveau. Dies wird im Verlauf des Kapitels detaillierter untersucht.

Rechteckiges Profil (rct4) - 10° - keine Symmetrie-Restriktion

Der finale Entwurf dieser Optimierung mit der GHT stellt die, hinsichtlich der Zielfunktion, beste Topologie aller Untersuchungen bei einer Impaktorneigung von 10° dar. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 6-4 dargestellt. Im Vergleich mit Abbildung 6-1 sind die Graphen um 90° gedreht dargestellt.

Während der Entwurf der Heuristik *Insert Small Chambers* bei dieser Impaktorneigung mittels globaler Biegung deformiert (starkes Abfallen des anfänglich hohen Kraftniveaus), weist der finale Entwurf der GHT einen gleichmäßigen, nahezu rechteckigen Kraft-Weg-Verlauf (nach dem Erreichen des Faltenbeul-Kraftniveaus) auf. Die vergleichsweise gute Performance dieses Entwurfs lässt sich hierbei aus den

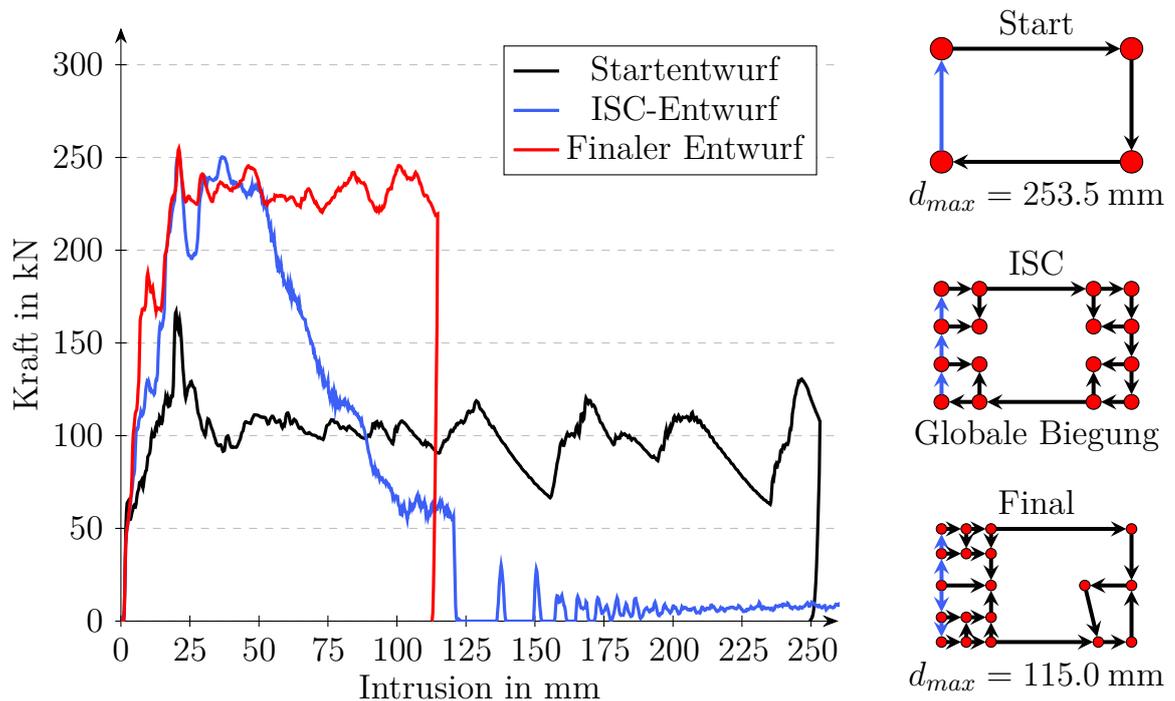


Abbildung 6-4: Kontaktkraft-Intrusions-Kurven für ausgewählte Entwürfe (rechteckiges Profil (rect4), 10° , keine Symmetrie-Restriktionen, die durch den geneigten Impaktor zuerst getroffene Seite wird im Graphen blau dargestellt)

unterschiedlichen Kammergrößen bzw. Wandlängen ableiten, wobei die kleinsten Kammern auf der zuerst crashbelasteten Seite des Profilquerschnittes vorzufinden sind. Der finale Entwurf der GHT entstand aus einem zur y-Achse symmetrischen Profil, auf welchem die Heuristik *Delete Needless Walls* aktiv geworden ist und eine innere Wand im oberen rechten Teil des Querschnitts gelöscht hat.

T-Profil (T1) - 0° - keine Symmetrie-Restriktion

Der Startentwurf in dieser Untersuchung weist aufgrund der vielen Ecken, an welchen effizient Energie absorbiert werden kann, einen im Vergleich zu den anderen Startentwürfen guten Intrusionswert auf. Der finale Entwurf der GHT ist zudem das beste Optimierungsergebnis hinsichtlich der Zielfunktion innerhalb der gesamten Untersuchung für Profile unter 0° . Abbildung 6-5 zeigt beide Querschnitte sowie deren Kraft-Weg-Verläufe. Der finale Entwurf verfügt über ein mittleres Kraftniveau, welches nur 20 % unter der maximalen Kraft und, abgesehen von einem Kraftabfall nach der ersten Kraftspitze, auf einem hohen Niveau liegt. Zu beachten ist an dieser Stelle, dass aufgrund der hohen axialen Steifigkeiten mit

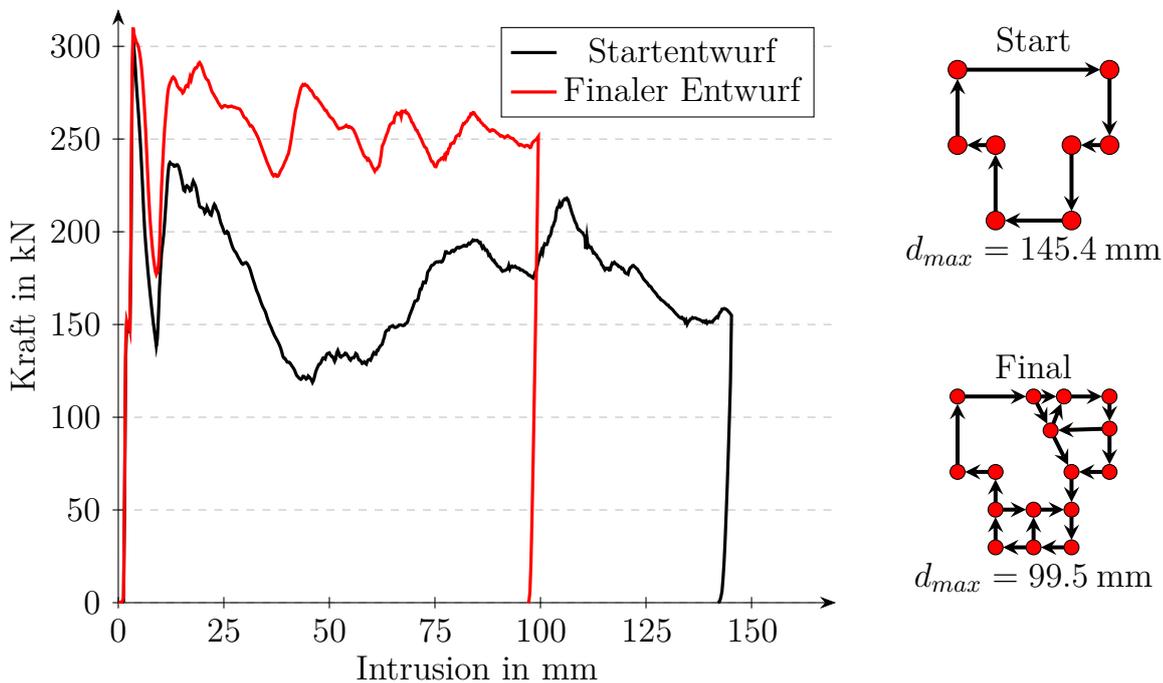


Abbildung 6-5: Kontaktkraft-Intrusions-Kurven für ausgewählte Entwürfe (T-Profil (T1), 0° , keine Symmetrie-Restriktionen)

dieser Außengeometrie eine größere Anfasung aufgebracht werden musste (vgl. Abschnitt 6.1.2).

I-Profil - 0° - xy-Symmetrie-Restriktion

In dieser exemplarischen Optimierung wird das Ergebnis der GHT mit einer Referenztopologie aus (Kohar et al. 2016) verglichen, welche ebenfalls durch die Heuristik *Create Cross Structures* vorgeschlagen wird. Anzumerken ist, dass das Profil aus (Kohar et al. 2016) größere Querschnittsdimensionen aufweist. Zudem wurde in der Arbeit von Kohar et al. (2016) mit einem anderen Materialmodell und mit einer umfangreichen Wanddickenoptimierung gearbeitet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-6 dargestellt. Bei dieser Optimierung ist eine xy-Symmetrie-Restriktion aktiv.

Der finale Entwurf der GHT weist eine Reduktion der maximalen Intrusion um 16 % im Vergleich zur Referenztopologie auf. Eine wiederkehrende Eigenschaft ist die Existenz kleiner Kammern und unterschiedlicher Kammergrößen bzw. Wandlängen im Profilquerschnitt. Neben dem vergleichsweise komplexen finalen

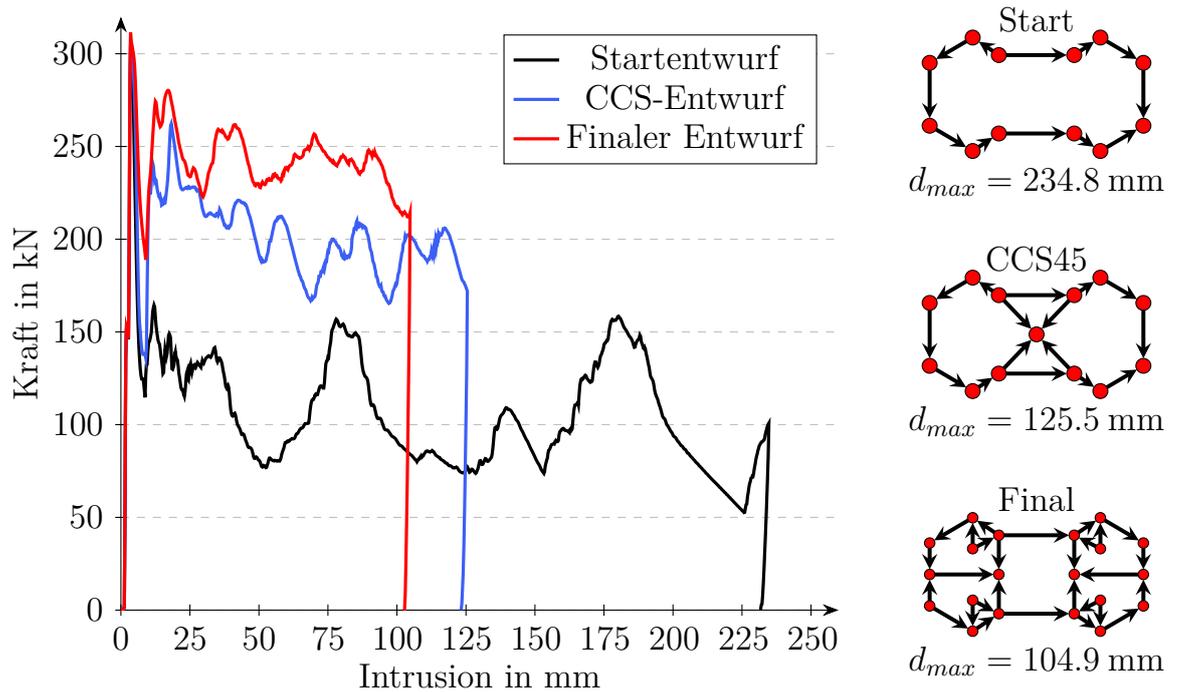


Abbildung 6–6: Kontaktkraft-Intrusions-Kurven für ausgewählte Entwürfe (I-Profil (I), 0° , xy-Symmetrie-Restriktionen)

Entwurf der GHT gibt es jedoch Entwürfe mit weniger Kammern, welche ebenfalls eine wesentliche Verbesserung zum Referenzentwurf darstellen.

6.1.5 Identifikation allgemeiner Zusammenhänge

Ziel der folgenden Untersuchungen ist es, in den vorliegenden Topologieoptimierungen allgemeine Zusammenhänge zu finden und daraus Schlussfolgerungen für axial belastete Crashstrukturen abzuleiten. Zudem soll unter anderem die Effizienz der Methode hinsichtlich bestimmter Startentwürfe bzw. Außengeometrien aufgezeigt werden. Neben dem Einfluss der Außengeometrie soll zudem der Einfluss der Symmetrie-Restriktionen für Strukturen unter 0° Belastungswinkel bewertet werden. Weiter ist die Bewertung der Effizienz der einzelnen Heuristiken und das Ableiten von Einstellungsempfehlungen für die GHT Gegenstand dieses Abschnittes. Crashbelastete Profilstrukturen, welche mittels globaler Biegung deformieren, weisen in den vorliegenden Simulationen in der Regel einen Intrusionswert von mehr als 400 mm auf. Zur besseren Darstellung und Vergleichbarkeit wurden die entsprechenden Intrusionswerte in den folgenden Diagrammen auf 400 mm gesetzt und bei den Berechnungen der relativen Verbesserungen ebenfalls mit 400 mm

gewertet. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind auch in den Tabellen C-1 und C-2 aufgelistet.

Einfluss des Impaktorneigungswinkels

Abbildung 6-7 zeigt die Intrusionen der einzelnen Startentwürfe der GHT aufgetragen über den Impaktorneigungswinkel. Symmetrie-Restriktionen sind bei den in diesem Abschnitt vorgestellten Optimierungen nicht berücksichtigt.

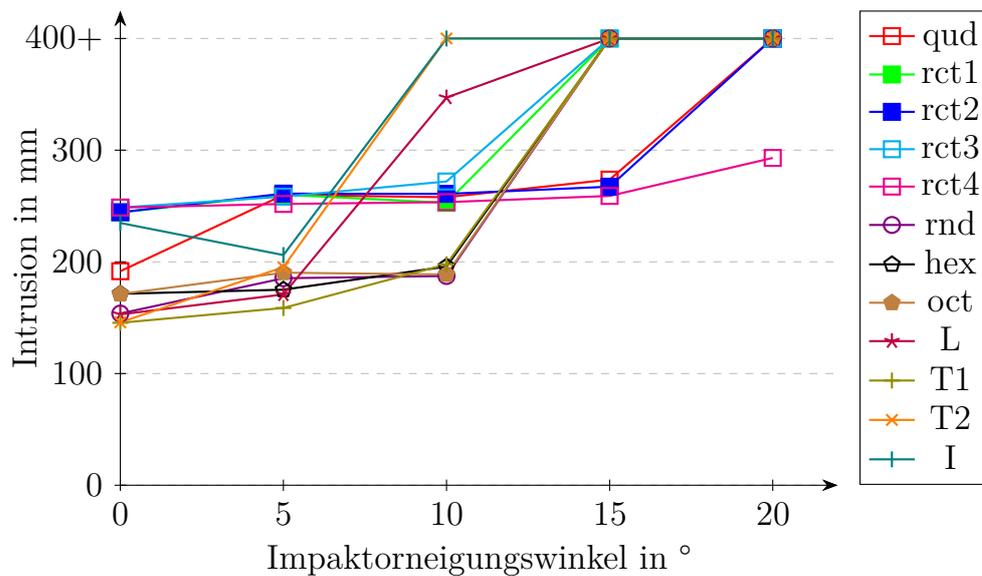


Abbildung 6-7: Intrusionen der Startentwürfe über dem Impaktorneigungswinkel

Es lässt sich feststellen, dass bei einem Impaktorneigungswinkel von 0° insbesondere dann vergleichsweise geringe Intrusionen auftreten, wenn die Außengeometrie viele Ecken bzw. kurze Wandlängen aufweist (z.B. Oktogon-, Hexagon-, T- und L-Querschnitt) oder rund ist. Hohe Intrusionen treten bei den Startentwürfen der Querschnitte mit großem Unterschied zwischen der Längen- und der Breiten-Dimension bzw. bei Strukturen mit vergleichsweise langen Wänden auf (rechteckige Querschnitte bzw. I-Querschnitt).

Weiter kann festgestellt werden, dass sich die Intrusionen bei den Startentwürfen nur dann maßgeblich zwischen 0° und 5° unterscheiden, wenn eine andere Faltenbeulform auftritt. Beispiele hierfür sind der Wechsel von einer extensionalen zu einer symmetrischen Faltenbeulform beim quadratischen Profil (qud), der I-Querschnitt (unterschiedliche Anfasungstrigger bei 0° und 5°) oder der T2-Querschnitt, bei welchem unter schräger Belastung die lange Wand zuerst crashbelastet wird.

Bei einem Impaktorneigungswinkel von 10° zeigen drei Startentwürfe eine Deformation mittels globaler Biegung (L-, T2- und I-Querschnitt). Wenn jedoch Faltenbeulen initiiert und aufrechterhalten werden kann, dann unterscheiden sich die Ergebnisse zwischen 5° und 10° Impaktorneigungswinkel nur in geringem Maße. Insbesondere der Oktogon-, der Hexagon- sowie der T1-Querschnitt zeigen auch bei einem Belastungswinkel von 10° noch vergleichsweise gute Intrusionswerte.

Steigt der Impaktorneigungswinkel auf 15° , zeigen nur noch drei Startentwürfe ausschließlich Faltenbeulen. Neben dem quadratischen Querschnitt sind das die beiden rechteckigen Querschnitte (rct2 und rct4), die an ihren jeweils kurzen Seiten zuerst crashbelastet werden. Für einen Impaktorneigungswinkel von 20° kann nur noch ein Profil (rct4) die Crashenergie mittels Faltenbeulen absorbieren.

In Abbildung 6–8 sind die Ergebnisse der finalen GHT-Entwürfe über den Impaktorneigungswinkel dargestellt. Zunächst lässt sich feststellen, dass sich unter einem Belastungswinkel von 0° mit jeder Außengeometrie eine performante Topologie finden lässt. Die vergleichsweise größten Intrusionswerte können bei den runden, hexagonalen und oktogonalen Außengeometrien festgestellt werden. Eine mögliche Ursache hierfür ist, dass die Entwicklung der Heuristiken mit Fokus auf quadratische und rechteckige Strukturen erfolgte und nicht alle Heuristiken (z.B. *Insert Small Chambers*) somit für andere Außengeometrien (sinnvolle) Topologievorschlüsse generieren können. Das beste Ergebnis hinsichtlich der Zielfunktion kann bei den T-Querschnitten festgestellt werden.

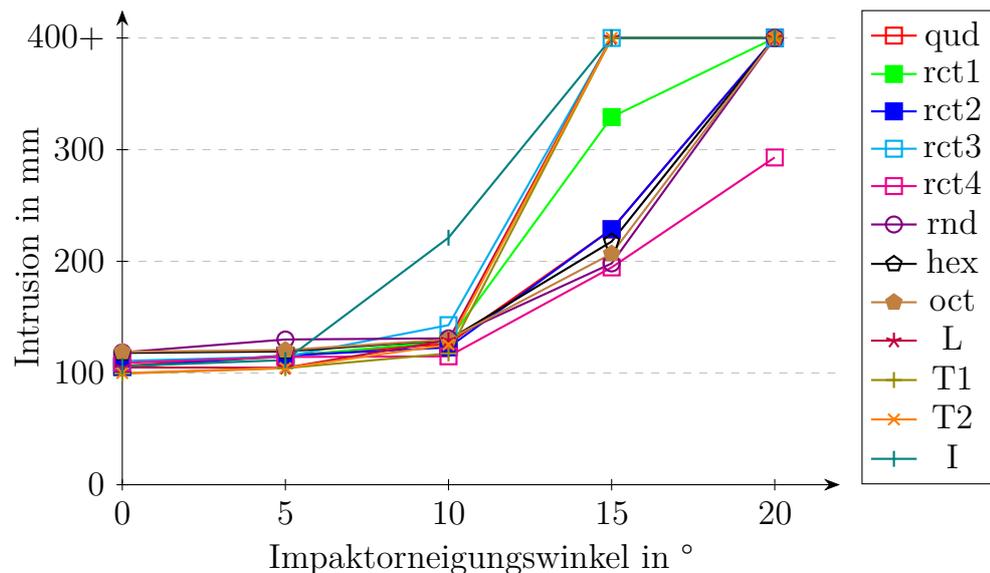


Abbildung 6–8: Intrusionen der finalen Entwürfe über den Impaktorneigungswinkel (ohne Symmetrie-Restriktion)

Für einem Belastungswinkel von 5° und 10° unterscheiden sich die Intrusionswerte der finalen Entwürfe nicht wesentlich von denen der rein axialen Untersuchungen. Einzig der I-Querschnitt zeigt eine substantielle Erhöhung der Impaktorintrusion und scheint daher besonders empfindlich hinsichtlich schräger Belastung.

Bei einer weiteren Erhöhung des Belastungswinkels auf 15° können für die I-, T1-, T2- und rct1-Querschnitte keine Querschnittstopologien mehr gefunden werden, welche nicht aufgrund von globaler Biegung deformieren. Für einen Impaktorneigungswinkel von 20° können nur noch für den rct4-Querschnitt Topologien gefunden werden, die keine globale Biegung zeigen. Diese weisen jedoch alle höhere Intrusionswerte auf als der Startentwurf.

Abbildung 6–9 stellt den Zusammenhang zwischen den initialen und den finalen Intrusionswerten her, indem die Reduktion der Intrusion durch die Topologieoptimierung für die einzelnen Entwürfe in Abhängigkeit vom Impaktorneigungswinkel aufgezeigt wird. Ohne Impaktorneigung bzw. bei kleinen Winkeln konnten die größten Verbesserungen bei Außengeometrien mit anfänglich hoher Intrusion erreicht werden. Das trifft insbesondere auf die quadratischen bzw. rechteckigen Strukturen zu. Wenn der Startentwurf vergleichsweise gute Intrusionswerte aufweist, ist die relative Verbesserung geringer.

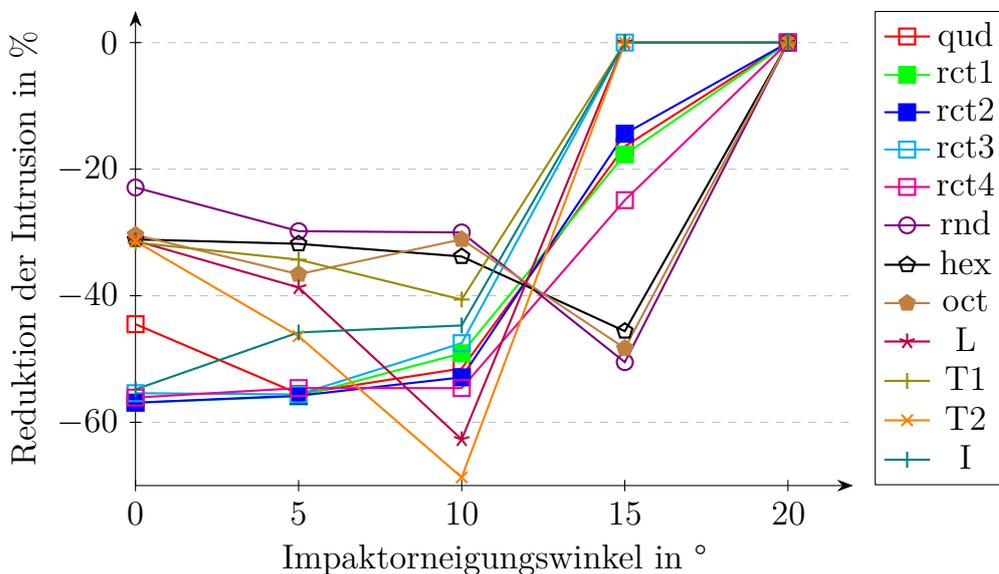


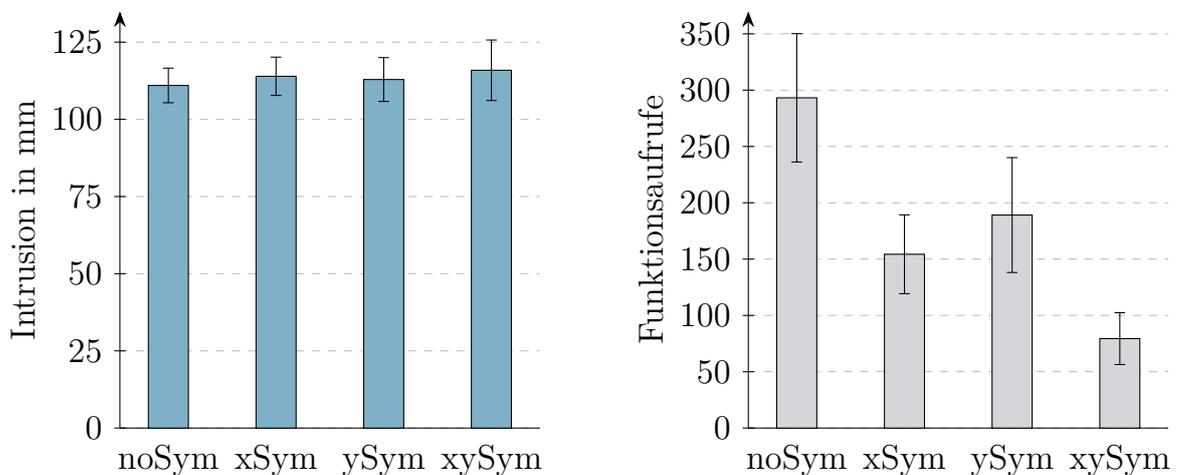
Abbildung 6–9: Prozentuale Reduktion der Intrusionen zwischen Startentwurf und finalen Entwurf (ohne Symmetrie-Restriktion)

Mit steigendem Belastungswinkel weisen insbesondere diejenigen Strukturen hohe relative Verbesserungen auf, bei denen der Startentwurf globale Biegung zeigt und diese durch topologische Modifikationen verhindert werden kann. Beispiele

hierfür sind bei einem Belastungswinkel von 10° die L- und T2-Querschnitte sowie bei einem Belastungswinkel von 15° die runden (rnd), oktogonalen (oct) und hexagonalen (hex) Querschnitte.

Einfluss der Symmetrie-Restriktionen

Abbildung 6–10 zeigt den Einfluss der Symmetrie-Restriktionen auf die Zielfunktion sowie auf die benötigte Anzahl der Funktionsaufrufe für die Topologieoptimierungen mit 0° -Impaktorneigungswinkel. Dabei sind jeweils die Mittelwerte aus den Topologieoptimierungen sowie die entsprechenden Standardabweichungen dargestellt. Für die Untersuchung werden nur Optimierungen betrachtet, bei denen der Startentwurf eine xy-Symmetrierestriktion zulässt. Es lässt sich feststellen, dass die Einschränkung des Entwurfsraums durch Symmetrie-Restriktionen tendenziell zu höheren finalen Intrusionswerten innerhalb der Topologieoptimierung mit der GHT führt. Dieser Zusammenhang gilt jedoch nicht für jede der untersuchten Außengeometrien. Zudem sind die Unterschiede, gemessen an der Streuung und der Verbesserung hinsichtlich der Startentwürfe, gering.



(a) Einfluss der Symmetrie-Restriktionen auf die Intrusionswerte der finalen Entwürfe

(b) Einfluss der Symmetrie-Restriktion auf die Anzahl der Funktionsaufrufe

Abbildung 6–10: Einfluss der Symmetrie-Restriktion auf das Optimierungsergebnis und die Anzahl der Funktionsaufrufe

Demgegenüber steht eine drastische Reduktion an Funktionsaufrufen (bis zu 73 % bei xy-Symmetrie) durch das Anwenden von Symmetrie-Restriktionen. Ursächlich hierfür ist, dass sich die Topologievorschlage der Heuristiken durch die Einschränkung des Entwurfsraums reduzieren bzw. die Unterschiede zwischen den Entwürfen

geringer sind. Folglich werden mehr gleiche Topologien aussortiert bzw. ähnliche Topologien nicht weiterverfolgt. Zudem wächst die Anzahl der Wände bzw. Kammern bei der Verwendung einer Symmetrie-Restriktion schneller an. Hierbei werden Topologieklassen übersprungen. Ein weiterer Punkt ist, dass die Heuristiken auf Basis eines erfolgreichen Entwurfs nicht mehr nur eine kleine Änderung (z.B. das Hinzufügen einer zusätzliche Wand) durchführen können. Es werden hingegen meist direkt umfangreichere Modifikationen durchgeführt, welche folglich tendenziell zu größeren Sprüngen bei den Strukturantworten führen. Der Bereich um einen erfolgreichen Entwurf wird damit weniger genau abgetastet. Insbesondere bei einer xy -Symmetrie-Restriktion steigt die Anzahl der Wände und Kammern schnell an. Das führt dazu, dass Vorschläge aufgrund von Verletzungen der Fertigungsrandbedingungen (z.B. der minimal erlaubten Wanddicke) ungültig sind und nicht weiter verfolgt werden. Die Unterschiede zwischen der Anzahl der benötigten Funktionsaufrufe bei den x - und y -Symmetrierestriktionen sind vermutlich auf die Umsetzung der Methode in der GHT-Software zurückzuführen.

Für die Steigerung der Effizienz der Methode ergibt sich daraus der Schluss, dass durch die Verwendung von Symmetrie-Restriktionen, bei geringen Einbußen in der Ergebnisqualität, die Anzahl der notwendigen Funktionsaufrufe reduziert werden kann. Ein guter Kompromiss aus Funktionsaufrufen und der Untersuchung des Entwurfsraums stellt sich bei der Verwendung einer x - bzw. y -Symmetrie-Restriktion ein. Die Art der Symmetrie-Restriktion sollte dabei Lastfall- und Außengeometrie-spezifisch gewählt werden.

Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Heuristiken

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Heuristiken werden zwei Kriterien eingeführt:

- **Auftreten als Heuristik mit der besten Gesamtperformance**

Innerhalb jeder Iteration der GHT wird den aktiv gewordenen Heuristiken ein Rang auf Grundlage ihrer Restriktionsverletzung und bei gleicher Verletzung anhand ihrer Zielfunktion zugewiesen. Wird eine Heuristik innerhalb einer Iteration mehrmals aktiv, wird als Rang der Heuristik der Mittelwert der Einzelränge bestimmt. Anschließend wird innerhalb jeder Iteration ein relativer Rang (zwischen 0 und 1) für die Heuristiken berechnet. Aus den relativen Rängen der einzelnen Iterationen ergibt sich dann die Gesamtperformance, welche dem gemittelten relativen Rang der einzelnen Iterationen entspricht.

- **Auftreten der Heuristik im jeweiligen finalen Entwurf der GHT**

Für diese Metrik wird ausgewertet, welche Heuristiken jeweils bei den finalen Entwürfen aktiv geworden sind. Mit anderen Worten ausgedrückt bedeutet dies, welche Heuristiken notwendig waren, um die finale Topologie zu ermöglichen.

Bei der Auswertung der Gesamtperformance der einzelnen Heuristiken weist die Heuristik *Insert Small Chambers* die größte Anzahl an Nennungen als Heuristik mit der besten Gesamtperformance auf. Das ist folgerichtig, da diese Heuristik in jeder Optimierung maximal ein einziges Mal aufgerufen wird und dabei oft zu einer vergleichsweise großen Verbesserung der Zielfunktion, insbesondere bei den quadratischen und rechteckigen Außengeometrien führt. Mit einigem Abstand folgt die Heuristik *Remove Small Chambers*. Diese Heuristik führt insbesondere bei den Lastfällen mit einem Impaktorneigungswinkel $> 0^\circ$ dazu, dass die Strukturen nachgiebiger und somit tendenziell weniger anfällig für globale Biegung werden. Demgegenüber stehen Heuristiken wie *Create Cross Structures*, *Create Different Wall Lengths*, *Use Deformation Space Compression*, *Support Collapsing Walls* sowie die Heuristiken *Counter Global Bending V-Support* und *Counter Global Bending Symmetry*, welche nie oder nur selten die beste Heuristik bei der jeweiligen Optimierungsaufgabe sind. Nachteilig an dieser Metrik ist allerdings, dass Heuristiken, die in der Regel häufig aktiv werden (wie beispielsweise *Use Deformation Space Tension* und *Use Deformation Space Compression*) aufgrund der Mittelung über alle Entwürfe der Heuristik, trotz einiger guter Topologievorschlüsse, tendenziell eher eine mittelmäßige Gesamtperformance aufweisen und daher in dieser Untersuchung schlechter abschneiden.

Hinsichtlich der Häufigkeit des Auftretens der Heuristiken in den finalen Entwürfen zeigt sich, dass bei vielen finalen Entwürfen die Heuristik *Delete Needless Walls* aktiv wurde. Diese Heuristik entfernt vergleichsweise gering belastete Wände aus dem Querschnitt und ermöglicht somit eine höhere Wanddicke bei vergleichsweise effizienten Wänden. Zudem ist dies eine Heuristik, die bei allen Entwürfen mit inneren Wänden aktiv werden kann. Die Heuristiken *Use Deformation Space Tension* und *Use Deformation Space Compression* mit dem in Abschnitt 5.1.2 vorgestellten Ansatz treten ebenfalls häufig bei den finalen Entwürfen auf. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass sie stark (falten-)beulende Wände abstützen und somit zu mehr Profilknoten und damit zu besseren Energieabsorptionseigenschaften führen. Weitere Heuristiken, die häufig für die finalen Entwürfe aktiv werden, sind *Insert Small Chambers*, *Split Long Walls*, *Balance Energy Density* sowie die Heuristik *Connect Low Energy Walls*. Im Gegensatz dazu kommen die Heuristiken

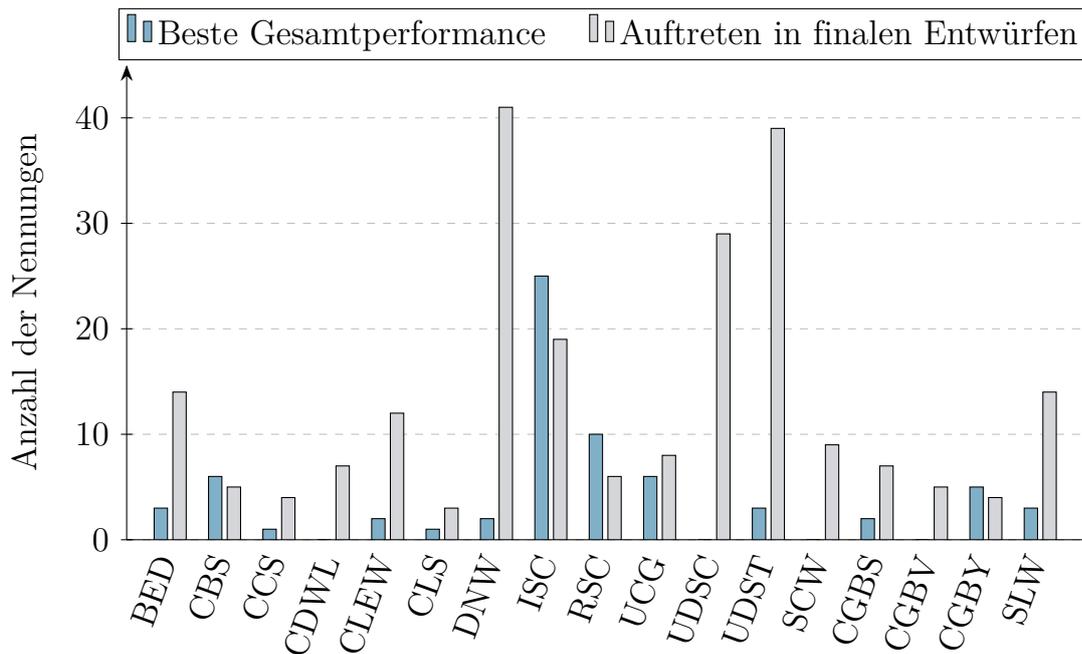


Abbildung 6–11: Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Heuristiken (vgl. Seite VII für das Abkürzungsverzeichnis der Heuristiken)

Create Lattice Structures, *Create Cross Structures* sowie *Counter Global Bending Y-Support* bei der Entstehung der finalen Entwürfe nur vergleichsweise selten zum Einsatz.

Um die Effizienz der GHT hinsichtlich der Anzahl der benötigten Funktionsaufrufe zu steigern, kann aus dieser Untersuchung abgeleitet werden, dass vorzugsweise die Heuristiken *Create Lattice Structures* und *Create Cross Structures* bei der Topologieoptimierung axial belasteter Crashstrukturen deaktiviert werden können. Bei beiden Heuristiken handelt es sich um Ansätze, welche nicht auf einer Analyse von Simulationsergebnissen basieren. Ihr primäres Ziel ist es typische Ingenieurslösungen innerhalb des automatisierten Optimierungsprozesses zu überprüfen. Dabei schlagen sie in vielen Iterationen meist mehrere Entwürfe vor, welche im Vergleich mit den Entwürfen der anderen Heuristiken oft nachteilig hinsichtlich der in dieser Untersuchung gewählten Zielfunktion sind. Eine Deaktivierung dieser Heuristiken kann somit die Anzahl der benötigten Funktionsaufrufe effektiv reduzieren.

6.1.6 Exemplarische Variation weiterer Modellparameter

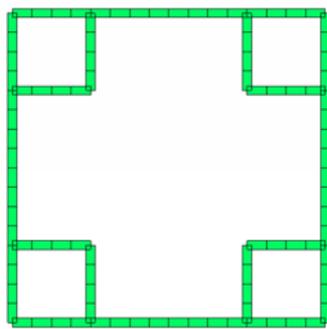
In den vorangegangenen Topologieoptimierungen und Untersuchungen wurden eine Vielzahl verschiedener Außengeometrien unter Variation des Impaktor-Neigungswinkels sowie der Symmetrie-Restriktionen analysiert. Neben diesen beiden Einflussfaktoren können jedoch eine Vielzahl weiterer Modellparameter variiert werden. Exemplarisch sollen an dieser Stelle daher die Modellierung von geometrischen Details, die Berücksichtigung eines Versagensmodells sowie die Aluminiumlegierung des Profils variiert werden. Die folgenden Untersuchungen werden am quadratischen Profil unter 0° Impaktor-Neigungswinkel und ohne Symmetrie-Restriktion durchgeführt. Ziel ist es die in den vorangegangenen Abschnitten aufgezeigten Ergebnisse und Zusammenhänge besser einordnen zu können.

Berücksichtigung geometrischer Details und Versagensmodellierung

Dieser Abschnitt gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil werden zwei Topologieoptimierungen miteinander verglichen. Bei einer Topologieoptimierung werden geometrische Details wie Verrundungen an den Profilkanten (RC, vgl. Abschnitt 4.2.1) und Materialansammlungen an den Profilknoten (MA, vgl. Abschnitt 4.2.2) sowie Materialversagen deaktiviert. Die zweite Topologieoptimierung entspricht den Einstellungen und Ergebnissen für das quadratische Profil (qud) aus Abschnitt 6.1.4. Im zweiten Teil werden exemplarische Topologieentwürfe detaillierter verglichen, indem die Intrusionswerte in Abhängigkeit der genannten Optionen einzeln und in Kombination untersucht werden.

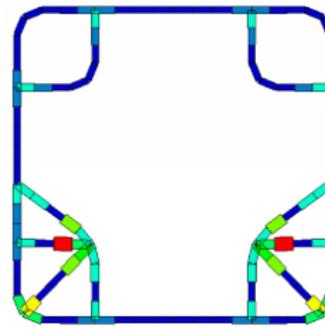
Abbildung 6–12 zeigt die finalen Entwürfe der beiden Topologieoptimierungen. Wenn weder geometrische Details noch Materialversagen berücksichtigt werden, ist der Entwurf der Heuristik *Insert Small Chambers* der finale Entwurf der Topologieoptimierung mit der GHT. Werden Verrundungen, Materialansammlungen und Versagen berücksichtigt, werden innerhalb der Topologieoptimierung bessere Entwürfe als der Entwurf der Heuristik *Insert Small Chambers* gefunden. Eine Berücksichtigung dieser geometrischen Details bei der Topologieoptimierung von Aluminium-Strangpressstrukturen erscheint daher im Hinblick auf das Optimierungsergebnis sinnvoll.

In der Spalte *Basis* in Tabelle 6–2 sind die Intrusionswerte der beiden finalen Topologien aus Abbildung 6–12 jeweils ohne die Berücksichtigung der geometrischen Details sowie ohne Materialversagen aufgeführt. Beide Entwürfe weisen dabei



(a) Keine Berücksichtigung von geometrischen Details und Versagen (Final 1)

Wanddicke
■ 3.52 mm
 ⋮
■ 1.72 mm



(b) Berücksichtigung von geometrischen Details und Versagen (Final 2)

Abbildung 6–12: Finale Entwürfe zweier Topologieoptimierungen mit unterschiedlichen Modellierungsdetails beim quadratischen Profil (qud) ohne Symmetrie-Restriktionen unter axialer Belastung (0°)

vergleichbare Intrusionswerte auf. Eine Berücksichtigung all dieser Modellierungsdetails (vgl. Spalte *MA*, *RC* & *Fail* in Tabelle 6–2) führt hingegen dazu, dass die Intrusionen für beide Entwürfe sinken. Für den finalen Entwurf der Optimierung mit aktivierten Details sinkt die Intrusion jedoch wesentlich stärker.

Tabelle 6–2: Einfluss von Versagensmodellierung (Fail) und geometrischer Details (MA und RC) auf die Intrusionswerte (in mm) für ausgewählte Entwürfe

	Basis	Fail	MA	RC	Fail & MA	Fail & RC	MA & RC	MA, RC & Fail
Final 1	119.6*	119.6	119.5	119.3	119.5	119.3	116.4	116.4
Final 2	119.5	119.5	116.9	113.0	117.0	113.1	106.3	106.4**

*Entwurf aus Abbildung 6–12 (a)

**Entwurf aus Abbildung 6–12 (b)

Durch ein selektives (De-)Aktivieren dieser Modellierungsdetails (vgl. Tabelle 6–2) lässt sich aufzeigen, dass die Berücksichtigung von Materialversagen für die beiden untersuchten Entwürfe einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Intrusionswerte hat. Die getrennte Aktivierung von Verrundungen an Profilkanten und Materialansammlungen an Profilknoten führt nur bei der zweiten Topologie zu einer geringfügigen Reduzierung der Intrusionswerte. Erst die Kombination beider geometrischen Details (MA und RC) führt zu der maßgeblichen Intrusionsreduktion, insbesondere für den zweiten Entwurf, da es hier zu größeren Materialansammlungen an Profilknoten kommt.

Aus den Ergebnissen in Tabelle 6–2 kann jedoch nicht abgeleitet werden, dass die Berücksichtigung von Materialversagen grundsätzlich eine untergeordnete

Rolle spielt. Aus den Beobachtungen bei schräg belasteten Strukturen kann die Berücksichtigung von Versagen darüber entscheiden, ob eine Struktur aufreißt und dadurch globale Biegung auftritt oder diese weiter mittels Faltenbeulen deformiert. Zudem handelt es sich bei den vorliegenden Aluminiumlegierungen um vergleichsweise duktile Aluminiumlegierungen. Bei spröderen Werkstoffen spielt die Versagensmodellierung ebenfalls eine bedeutendere Rolle, da diese möglicherweise nicht die benötigte Duktilität zum Ausformen der Falten haben.

Einfluss der Aluminiumlegierung

In dieser Untersuchung werden drei Topologieoptimierungen des quadratischen Profils (qud) im axialen Lastfall ohne Symmetrie-Restriktionen untersucht. Als Aluminiumlegierung für das Profil werden die Aluminiumlegierungen aus Abbildung 4-4 bzw. Tabelle 4-2 verwendet. Abbildung 6-13 zeigt die Graphen der finalen Entwürfe der GHT bei Verwendung der jeweiligen Legierungen. Zudem sind die Intrusionswerte für die finale Struktur sowie für den Referenzentwurf der Heuristik *Insert Small Chambers* angegeben.

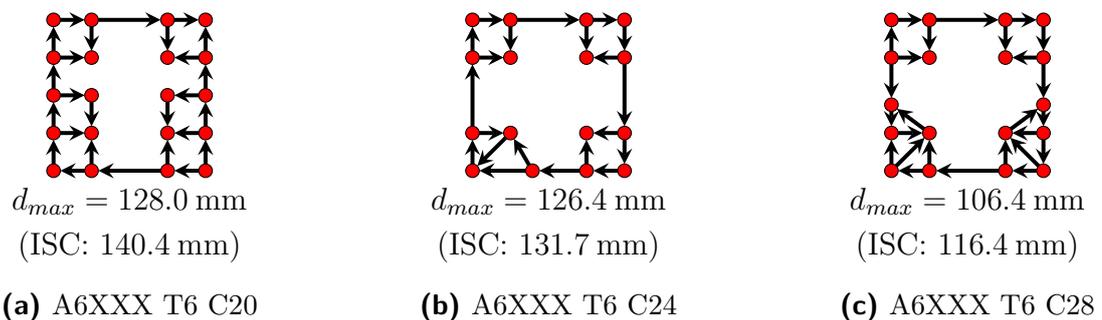


Abbildung 6-13: Variation der Aluminiumlegierung beim quadratischen Profil (qud) ohne Symmetrie-Restriktionen unter axialer Belastung (0°)

Die Topologien der finalen Entwürfe unterscheiden sich zwischen den einzelnen Optimierungen, was am nichtlinearen Strukturverhalten, dem nicht-konvexen Lösungsraum, den zugrundeliegenden Algorithmen sowie der Software-Implementierung der Heuristiken liegt. Generell besteht jedoch die Tendenz, dass die Intrusionen mit ansteigender Fließgrenze des Werkstoffs abnehmen. Der Unterschied der Intrusionen zwischen A6XXX T6 C20 und A6XXX T6 C24 ist dabei vergleichsweise gering. Eine mögliche Ursache hierfür könnten die unterschiedlichen Steigungen der Spannungs-Dehnungs-Kurven im plastischen Bereich sein (vgl. Abbildung 4-4).

Zudem lässt sich feststellen, dass in allen drei Optimierungen jeweils signifikant bessere Strukturen gefunden werden konnten, als in den jeweiligen Vorschlägen

der Heuristik *Insert Small Chambers*. Jedoch basieren alle finalen Entwürfe auf dem Entwurf dieser Heuristik.

6.1.7 Diskussion der Ergebnisse

Die vorangegangenen Untersuchungen zeigen, dass axial belastete Crashstrukturen effizient mit der GHT optimiert werden können. Die Methode ist in der Lage mit einer akzeptablen Anzahl an Funktionsaufrufen eine signifikante Verbesserung der Strukturen hinsichtlich einer Zielfunktion zu erreichen. Es wurde zudem aufgezeigt, dass sich leistungsfähigere Alternativen für aus der Literatur als besonders effizient bekannte Topologien finden lassen. Die Untersuchungen zeigen zudem die Notwendigkeit individueller Betrachtungen für unterschiedliche Startentwürfe, Lastfälle, die Materialwahl, Fertigungsrandbedingungen und weiterer Parameter.

Unter 0° -Impaktorneigungswinkel verfügt das untersuchte T-Profil sowohl über den besten Startentwurf, als auch über den besten finalen Entwurf hinsichtlich der Zielfunktion. Bis zu einem Impaktorneigungswinkel von 10° können für alle untersuchten Außengeometrien signifikante Verbesserungen der Zielfunktion erzielt werden. Bei einem Impaktorneigungswinkel von 15° ist das weiterhin für einen Großteil der Außengeometrien möglich. Dabei konnte für einige der Außengeometrien, welche global biegende Startentwürfe aufweisen, eine Deformation mittels Faltenbeulen erreicht werden. Bei einem Impaktorneigungswinkel von 20° ist das in der vorliegenden Untersuchung nicht möglich. Die Untersuchungen zeigen zudem, dass geometrische Details (vgl. Abschnitt 4.2) bei der FE-Modellierung innerhalb eines Funktionsaufrufs in der Topologieoptimierung berücksichtigt werden sollten, da sie einen Einfluss auf die Ergebnisse der Topologieoptimierung haben können.

Um die Effizienz der Methode hinsichtlich der Funktionsaufrufe weiter zu steigern, konnten zwei Maßnahmen abgeleitet werden. Die Verwendung von Symmetriestriktionen ermöglicht hierbei eine signifikante Reduzierung der Funktionsaufrufe bei gleichzeitig akzeptabler Verschlechterung der Ergebnisqualität. Zudem konnten einige Heuristiken als vergleichsweise ineffizient identifiziert werden. Insbesondere bei Funktionsaufrufen mit hohem Ressourcenbedarf (z.B. Gesamtfahrzeug-Simulationen) kann eine Deaktivierung dieser Heuristiken im Optimierungsprozess vorteilhaft sein.

Eingeschränkt werden diese Feststellungen durch die Fokussierung der Untersuchungen auf eine Zielfunktion (maximale Impaktordintrusion). Schlussfolgerungen zu anderen Zielfunktionen (z.B. Minimierung der maximalen auftretenden Kraft)

lassen sich daraus nicht direkt ableiten. Zudem handelt es sich bei dem untersuchten Lastfall um einen vergleichsweise einfachen Lastfall. Der Prüfstand wurde beispielsweise nicht modelliert (Berücksichtigung von Prüfstandssteifigkeiten, Toleranzen), ebenso wenig die umliegenden Komponenten bei einem möglichen Fahrzeugeinsatz, welche sich beispielsweise auf die Lasteinleitung auswirken könnten. Weitere Potenziale werden zudem in einer nachgeschalteten Formoptimierung und/oder Dimensionierung erwartet. Einigen dieser Punkte wird in der nachfolgenden Optimierung einer Fahrzeugcrashbox Rechnung getragen.

6.2 Anwendungsbeispiel 2: Optimierung einer Fahrzeugcrashbox

In diesem Anwendungsbeispiel wird eine Topologieoptimierung einer stranggepressten Aluminium-Fahrzeugcrashbox als Teil eines Crash-Management-Systems (CMS) in einem simulierten Rollbockversuch durchgeführt. Der Rollbockversuch ist ein üblicher Komponentenversuch für das CMS. Der Lastfall ist dabei an den *RCAR Front Impact* Versicherungseinstufungstest ((RCAR 2017), vgl. auch Abschnitt 2.1.1) angelehnt. In zwei unterschiedlichen Optimierungen wird die Topologie der Crashbox hinsichtlich der maximalen Kontaktkraft sowie der Masse als Zielfunktionen optimiert.

6.2.1 FE-Modellbildung und Lastfall

Das FE-Modell ist in Abbildung 6–14 dargestellt. Die *RCAR Front Impact* Barriere ist als Starrkörper ausgeführt. Das CMS besteht aus einer linken und rechten Crashbox sowie dem Querträger. Über Schottbleche sind die Crashboxen mit den Längsträgern des Rollbocks verbunden. Diese Längsträger bestehen aus hochfesten Stahlprofilen, welche sich im vorliegenden Lastfall ausschließlich im elastischen Bereich verformen. Mittels Randbedingungen sind die Längsträger jeweils in x -Richtung geführt. Über Zwangsbedingungen sind die freien Enden der Längsträger mit einer Punktmasse $m = 1400 \text{ kg}$ verbunden. Aus Gründen des Versuchsaufbaus entspricht die Rollbockmasse nicht der Masse des Fahrzeugs, für welches dieses CMS vorgesehen ist. Um eine äquivalente kinetische Energie zu erreichen wird die initiale Geschwindigkeit (im Gegensatz zu den Angaben aus (RCAR 2017)) auf $v_0 = 4.917 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ erhöht.

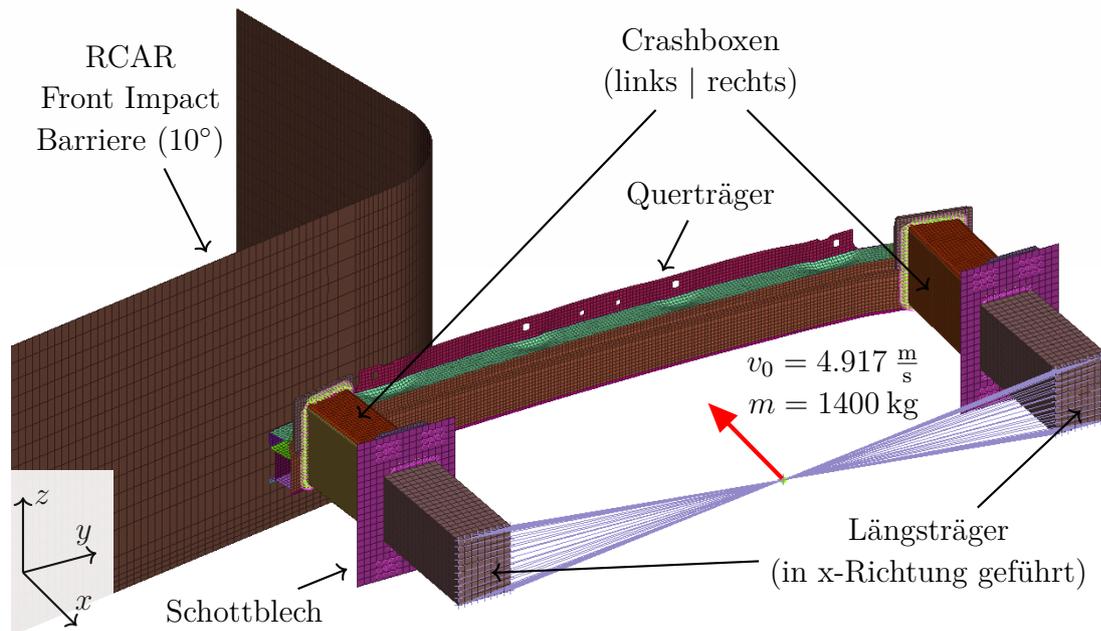


Abbildung 6–14: FE-Modell der Vorderwagenstruktur mit *RCAR Front Impact Barriere* (10°) und Randbedingungen

Die Crashboxen bestehen aus der Aluminiumlegierung A6XXX T6 C24 (vgl. Tabelle 4–2 bzw. Abbildung 4–4) mit HSR-Versagensmodellierung. Sie sind mit Belytschko-Tsay Schalenelementen mit reduzierter Integration und fünf Integrationspunkten über die Dicke diskretisiert. Die mittlere Elementkantenlänge beträgt 5 mm. Die Anbindung der Crashboxen an den Querträger und die Schottbleche erfolgt über sogenannte MPC-PLINKs (vgl. (ESI 2018)).

Der Startentwurf der Crashbox ist in Abbildung 6–15 dargestellt. Bei der automatischen FE-Modellerzeugung werden Verrundungen mit einer Bogenlänge von 10 mm und Materialansammlungen an Wandkreuzungen im Profilquerschnitt mit einem Radius von 3 mm berücksichtigt. Die rechte Crashbox wird durch ein Spiegeln der linken Crashbox an der x-z-Ebene der Fahrzeugmitte generiert. Das Abschneiden der Profilenden wird mittels eines ANSA-Skripts (BETA 2019) und einer automatischen Neuvernetzung der betroffenen Bereiche realisiert.

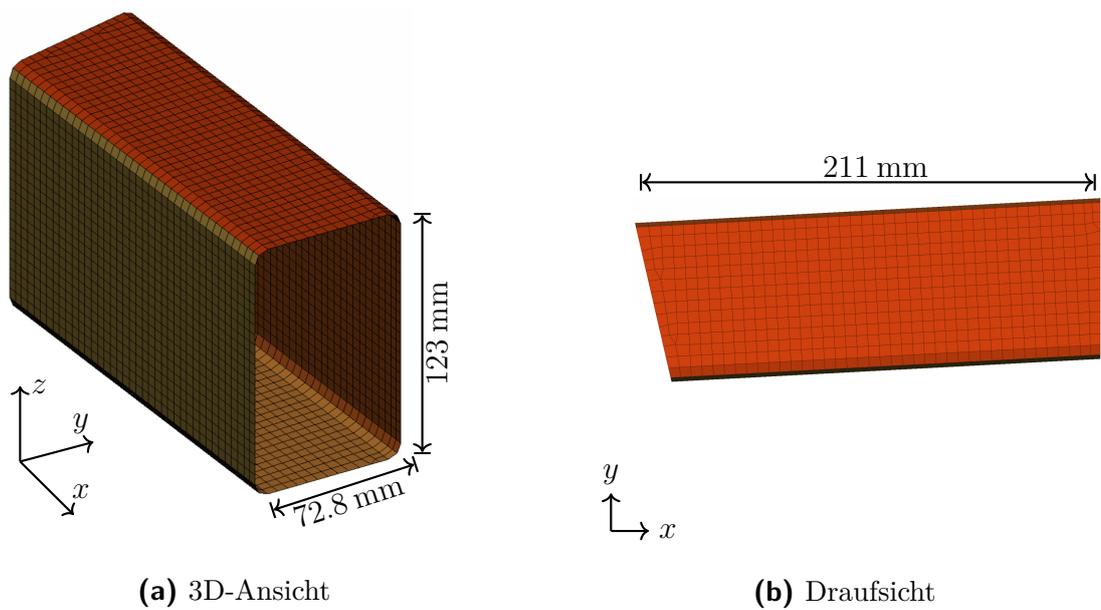


Abbildung 6–15: FE-Modell der linken Crashbox (Startentwurf, Wanddicke $t = 3.5$ mm, Querschnittsdimensionen vom unbeschnittenen Strangpressprofil)

6.2.2 Optimierungsaufgabe

Es werden zwei unterschiedliche Optimierungsaufgaben untersucht. Ziel ist jeweils die Topologieoptimierung der linken Crashbox, welche für die Crashsimulationen auf die rechte Seite gespiegelt wird.

Zum einen soll die maximale Kontaktkraft zwischen dem CMS und der RCAR-Barriere minimiert werden (vgl. Tabelle 6–3). Durch eine möglichst geringe Kontaktkraft sollen plastische Verformungen der nachgeschalteten Komponenten im Gesamtfahrzeug vermieden werden. Anstelle der Kontaktkraft könnte hierbei die Schnittkraft in der Crashbox oder im Längsträger des Rollbocks verwendet werden. Im zugehörigen Versuch wird die Kraft jedoch aus messtechnischen Gründen ebenfalls an der Barriere ermittelt. Zudem stellt die Kontaktkraft für diesen Lastfall erfahrungsgemäß eine geringfügig erhöhte Verschiebung der y -Werte im Kraft-Weg-Diagramm im Vergleich zu den erwähnten Schnittkräften dar und ist somit eine konservative Betrachtung. Als funktionale Restriktionen werden in dieser Optimierungsaufgabe Intrusions- und Massen-Restriktionen verwendet. Die maximale Intrusion wird an der Verschiebung der Punktmasse ausgewertet. Die Masse der Crashbox wird aus den FE-Ergebnisdaten ermittelt. Die Fertigungsrestriktionen für beide Optimierungsaufgaben sind (Ortmann 2015) entnommen.

Tabelle 6–3: Anwendungsbeispiel 2a: Definition der Optimierungsaufgabe
Minimierung der maximalen Kontaktkraft

Optimierungsziel	Minimierung der maximalen Kontaktkraft
Funktionale	Maximale Intrusion ≤ 130.0 mm
Restriktionen	Masse ≤ 0.650 kg
Fertigungs- restriktionen	$1.6 \text{ mm} \leq \text{Wanddicke} \leq 5.0 \text{ mm}$
	Verbindungswinkel zwischen zwei Wänden $\geq 15^\circ$
	Abstand zwischen zwei Wänden ≥ 10 mm

Zum anderen soll die Masse der Crashbox unter Einhaltung von Intrusions- und Kraft-Restriktionen minimiert werden. Diese Optimierungsaufgabe ist in Tabelle 6–4 dargestellt. Auf Symmetrie-Restriktionen wird in beiden Optimierungsaufgaben verzichtet. Zum einen findet dadurch eine bessere Entwurfsraumabtastung statt. Zum anderen ist die Lasteinleitung im vorliegenden Lastfall durch die schräge Barriere und den vorgeschalteten Querträger ebenfalls asymmetrisch.

Tabelle 6–4: Anwendungsbeispiel 2b: Definition der Optimierungsaufgabe
Minimierung der Masse

Optimierungsziel	Minimierung der Masse
Funktionale	Maximale Intrusion ≤ 130.0 mm
Restriktionen	Maximale Kontaktkraft ≤ 165 kN
Fertigungs- restriktionen	$1.6 \text{ mm} \leq \text{Wanddicke} \leq 5.0 \text{ mm}$
	Verbindungswinkel zwischen zwei Wänden $\geq 15^\circ$
	Abstand zwischen zwei Wänden ≥ 10 mm

Abbildung 6–16 zeigt den Startentwurf der beiden Topologieoptimierungen. In der äußeren Optimierungsschleife werden pro Iteration fünf konkurrierende Entwürfe weiterverfolgt. Die Heuristiken *Create Lattice Structures* und *Create Cross Structures* werden zur Reduzierung der Anzahl der Funktionsaufrufe deaktiviert (vgl. Abschnitt 6.1.5). Die Heuristik *Enforce Deformation Start Position* wird zur robusten Initiierung von Faltenbeulen aktiviert. Es werden Wandverprägungen an den seitlichen Kanten der Crashbox an der normierten Position 0.85 aufgebracht (vgl. Abschnitt 5.3.2). In der inneren Optimierungsschleife zur Evaluation der Heuristik-Entwürfe wird der Optimierungsalgorithmus SRSM mit linearen Polynomen (zwei Iterationen, zwei Entwürfe pro Iteration) verwendet (vgl. Abschnitt 3.3.2). Als Entwurfsvariable wird hierbei eine einheitliche Wanddicke für alle Wände der Crashbox festgelegt. Als Abbruchkriterium für die Optimierung werden drei Iterationen ohne Verbesserung der Restriktionsverletzung/Zielfunktion

verwendet. Um die Anzahl der Funktionsaufrufe zu reduzieren, wird eine abschließende Dimensionierung und Formoptimierung mit mehreren Entwurfsvariablen nicht durchgeführt.

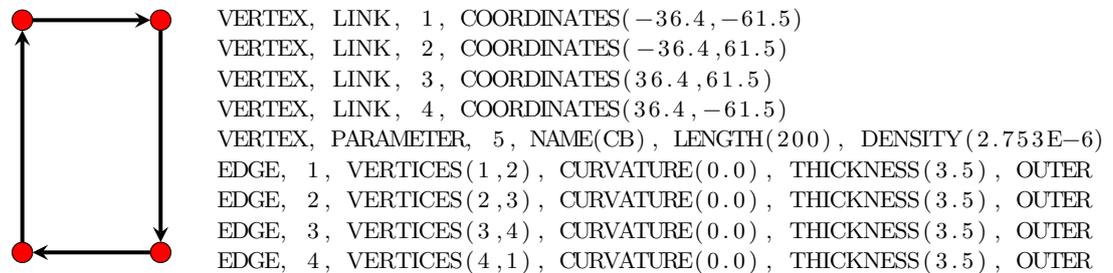


Abbildung 6–16: Graph des Startentwurfs für beide Optimierungsaufgaben

6.2.3 Optimierungsergebnisse

Anwendungsbeispiel 2a: Minimierung der maximalen Kontaktkraft

Im Rahmen dieser Optimierungsaufgabe werden 260 verschiedene Topologien mit 717 Funktionsaufrufen evaluiert. 36.5 % der Entwürfe erfüllen die Restriktionen. Abbildung 6–17 und Tabelle 6–5 zeigen die Optimierungshistorie für die Optimierungsaufgabe *Minimierung der maximalen Kontaktkraft*. Es wird jeweils der beste Entwurf einer Iteration dargestellt. Der Wert für die aufsummierten Restriktionsverletzungen wird dabei über eine Addition der Intrusions-Restriktionsverletzung (in mm) und der Massen-Restriktionsverletzung (in g) ermittelt. Der vollständige Entwurfsbaum der äußeren Optimierungsschleife ist in Abbildung C–1 (a) bzw. C–2 (a) dargestellt.

Der Startentwurf (Iteration 1) verfügt über eine hohe Restriktionsverletzung in Bezug auf die Intrusion und die Masse. Beim besten Entwurf der zweiten Iteration können die Zielfunktion sowie die Restriktionsverletzung signifikant reduziert werden. In Iteration 3 kann der beste Entwurf als einziger Entwurf die Restriktionen erfüllen. Der beste Entwurf hinsichtlich der Zielfunktion und unter Einhaltung der Restriktionen wird in Iteration 6 gefunden. Er verfügt über eine Wanddicke von $t = 1.67$ mm. Nach Erreichen des Abbruchkriteriums (keine Verbesserung der Restriktionsverletzung/Zielfunktion in den Iterationen 5, 7 und 8) wird die Topologieoptimierung beendet.

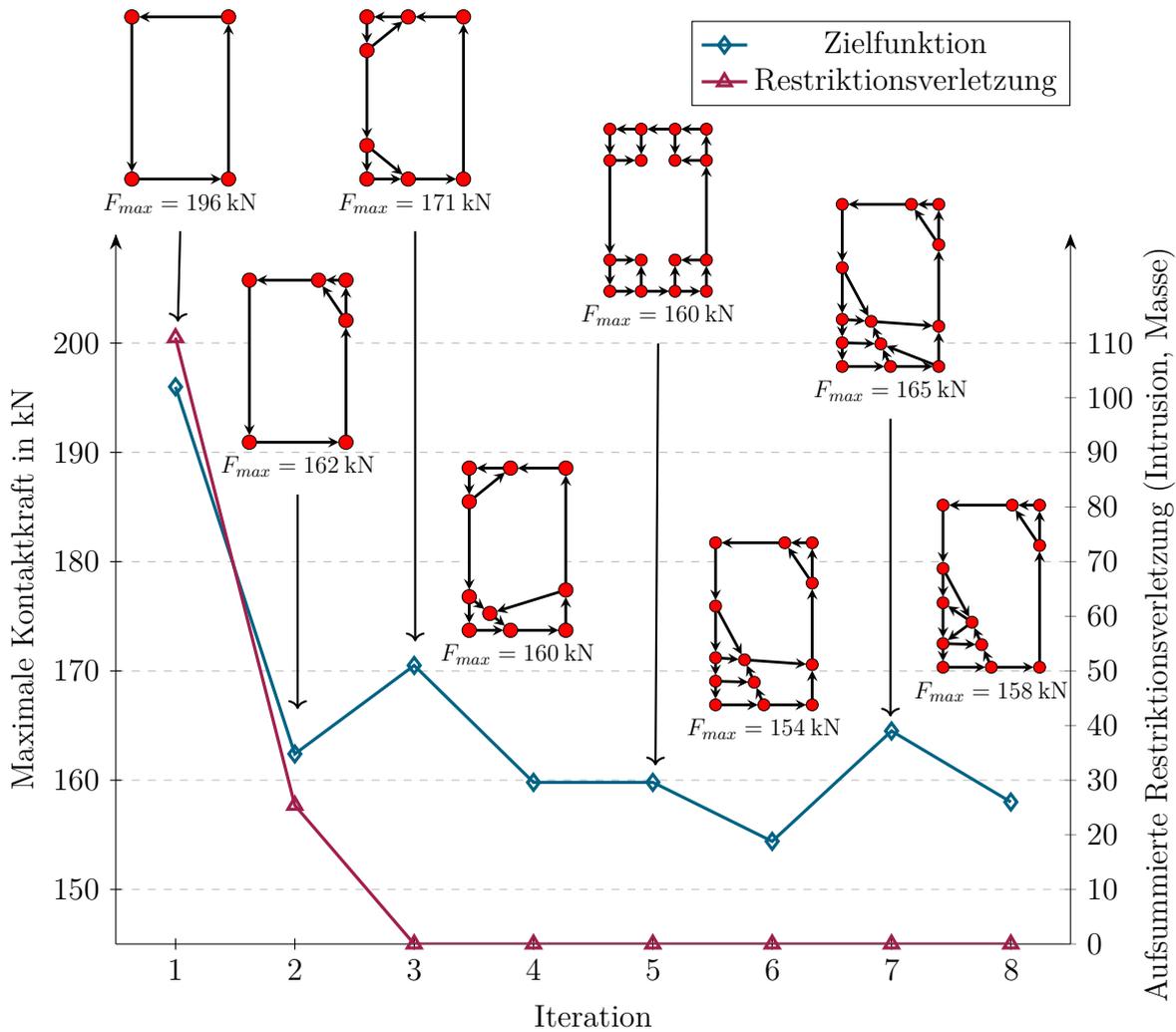


Abbildung 6–17: Entwicklung der Zielfunktion und der Restriktionsverletzung über die Iterationen der äußeren Optimierungsschleife für den jeweils besten Entwurf einer Iteration (Anwendungsbeispiel 2a: *Minimierung der maximalen Kontaktkraft*)

Den besten Entwürfen jeder Iteration aus Abbildung 6–17 ist gemein, dass sie über kleine Kammern in den Ecken verfügen. Insbesondere die linke untere Ecke wird durch zusätzliche Kammern verstärkt. Neben der Heuristik *Insert Small Chambers* werden diese kleinen Kammern ebenso von anderen Heuristiken vorgeschlagen. Die linke untere Ecke erweist sich als besonders effektiv, da der Querträger an dieser Stelle vergleichsweise nachgiebig ist und somit zusätzlichen Weg zur Energieabsorption durch die Crashbox freigeben kann. Die Heuristiken finden somit eine den umliegenden Komponenten angepasste Topologie.

Die Kraft-Weg-Kurven des Startentwurfs und des finalen Entwurfs sind in Abbildung 6–18 dargestellt. Die maximale Kontaktkraft konnte um 21 % im Vergleich

Tabelle 6–5: Optimierungshistorie für Anwendungsbeispiel 2a:
Minimierung der maximalen Kontaktkraft

	m in kg	Bester Entwurf jeder Iteration			Funktionsaufrufe
		F_{\max} in kN	d_{\max} in mm	Heuristik*	
Iteration 1 (Startentwurf)	0.7422	196.0	148.8	-	1
Iteration 2	0.6413	162.4	155.4	UDSC	32
Iteration 3	0.6498	170.5	129.6	CGBS	80
Iteration 4	0.6279	159.8	129.0	UDSC	118
Iteration 5	0.5310	159.8	129.9	ISC	134
Iteration 6 (Finaler Entwurf)	0.6071	154.5	127.7	BED	158
Iteration 7	0.6485	164.5	121.8	SCW	106
Iteration 8	0.6143	158.0	129.6	DNW	88

*Letzte für den besten Entwurf aktiv gewordene Heuristik zur Topologieänderung

zum Startentwurf reduziert werden. Gleichzeitig konnten die Intrusion und die Masse verringert werden. Während der Startentwurf nach der ersten Kraftspitze einen starken Kraftabfall aufweist, kann beim finalen Entwurf die Kraft auf einem gleichmäßigen Niveau (mit vergleichsweise geringen Schwankungen) gehalten werden.

Abbildung 6–19 zeigt das Deformationsverhalten der beiden Entwürfe zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Im Gegensatz zum Startentwurf verfügt der finale Entwurf neben kleinen Kammern über viele Wände unterschiedlicher Länge. Das führt zu unterschiedlichen Faltenbeulwellenlängen, welche den gleichmäßigen Kraft-Weg-Verlauf begünstigen. Zudem verfügt der finale Entwurf über drei Wandverprägungen (vgl. Abbildung 6–19 - zwei auf der zugewandten Seite und eine auf der längsten Wand der abgewandten, in der Darstellung nicht sichtbaren Seite), die ebenfalls dabei helfen die erste Kraftspitze zu reduzieren. Für den finalen Entwurf ist die sequenzielle Anwendung der folgenden Heuristiken zur Topologieänderung notwendig:

1. *Use Deformation Space Compression*
2. *Use Deformation Space Tension*
3. *Split Long Walls*
4. *Balance Energy Density*
5. *Balance Energy Density*

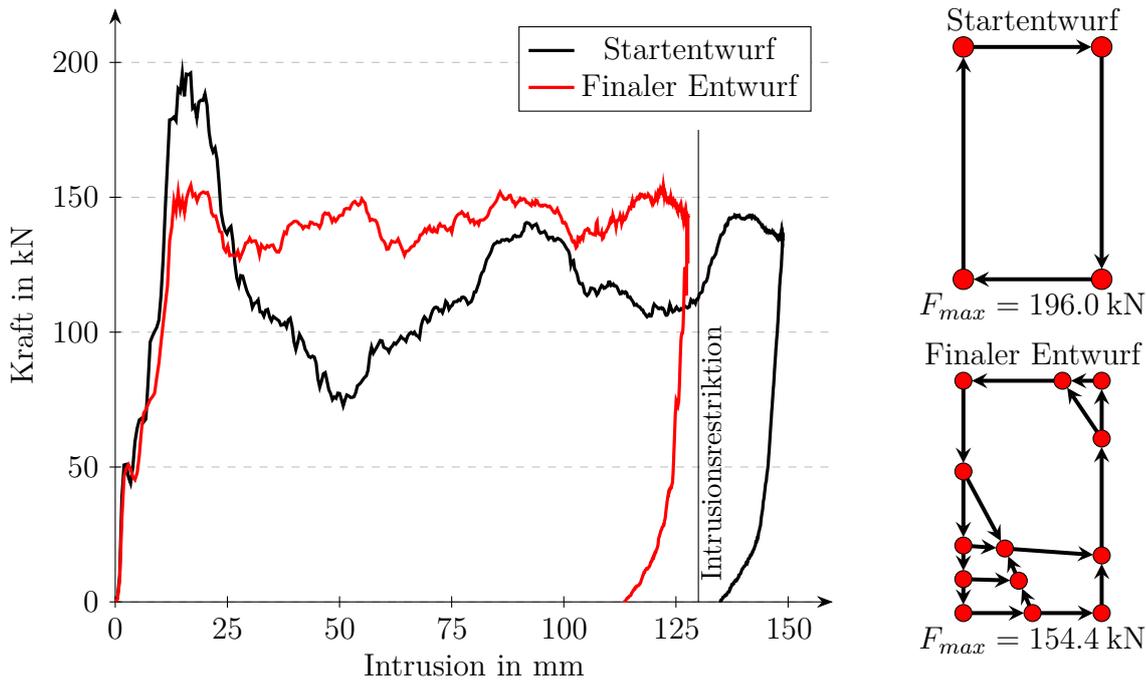


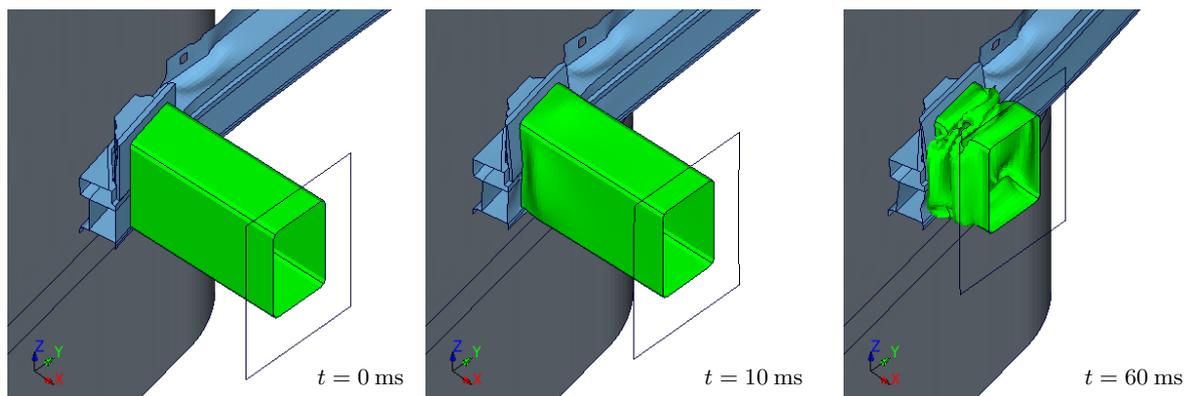
Abbildung 6–18: Kontaktkraft-Intrusions-Kurven für den Startentwurf und den finalen Entwurf aus Anwendungsbeispiel 2a: *Minimierung der maximalen Kontaktkraft*

Um die finale Topologie zu erhalten, wird somit eine Kombination aus etablierten, modifizierten und neu entwickelten Heuristiken zur Topologieänderung benötigt.

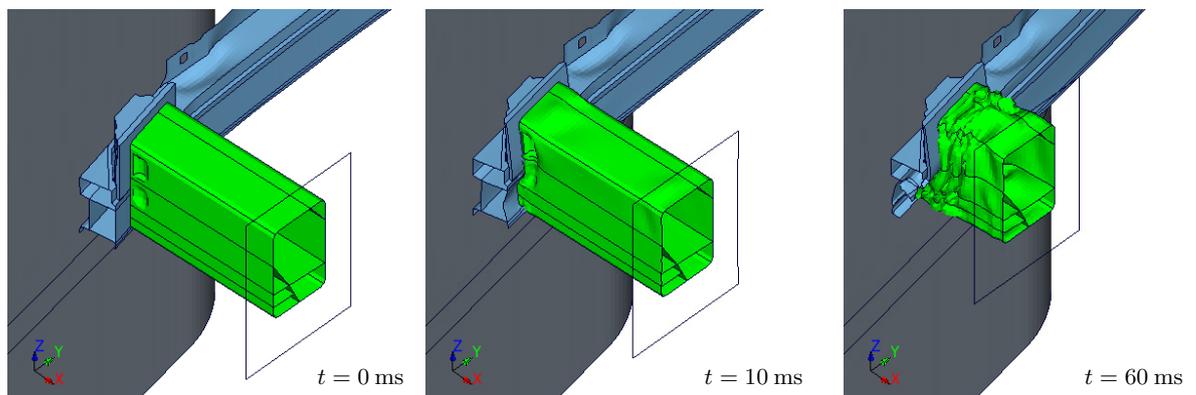
Anwendungsbeispiel 2b: Minimierung der Masse

Für die Topologieoptimierung zur Minimierung der Masse der Crashbox werden 293 verschiedene Topologien durch die Heuristiken in der äußeren Optimierungsschleife vorgeschlagen und diese mit insgesamt 768 Funktionsaufrufen evaluiert. 18,1 % der Entwürfe erfüllen die Restriktionen hinsichtlich der Kontaktkraft, der Intrusion sowie die Fertigungsrestriktionen. Die Optimierungshistorie in Bezug auf den jeweils besten Entwurf jeder Iteration ist in Abbildung 6–20 sowie in Tabelle 6–6 dargestellt. Der Wert für die aufsummierten Restriktionsverletzungen wird dabei über eine Addition der Intrusions-Restriktionsverletzung (in mm) und der Kraft-Restriktionsverletzung (in kN) ermittelt. Der vollständige Entwurfsbaum der äußeren Optimierungsschleife ist in Abbildung C–1 (b) bzw. C–2 (b) dargestellt.

Wie bei der *Optimierung der maximalen Kontaktkraft*, weist der Startentwurf (Iteration 1) Restriktionsverletzungen auf. Diese konnten im Optimierungsablauf jedoch sukzessive bis Iteration 4 für die besten Entwürfe der jeweiligen Iteration



(a) Startentwurf aus *Minimierung der maximalen Kontaktkraft* und *Minimierung der Masse*



(b) Finaler Entwurf aus Anwendungsbeispiel 2a: *Minimierung der maximalen Kontaktkraft*

Abbildung 6–19: Deformationsbilder der linken Crashbox zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Längsträger und Schottblech sind ausgeblendet)

auf 0 reduziert werden. Der GHT fällt es in dieser Optimierungsaufgabe jedoch wesentlich schwerer Entwürfe zu finden, welche die Restriktionen nicht verletzen. In Iteration 7 ist es der GHT beispielsweise nicht möglich einen Entwurf ohne Restriktionsverletzung vorzuschlagen. Hinzu kommt, dass es ab Iteration 6 Entwürfe gibt, welche die funktionalen Restriktionen erfüllen, jedoch die Fertigungsrestriktionen hinsichtlich der minimalen Wanddicke erreichen. Eine weitere Gewichtsreduktion ist folglich für diese Topologie nicht mehr möglich. Der finale Entwurf, welcher in Iteration 8 gefunden wird, liegt mit einer Wanddicke von $t = 1.62$ mm ebenfalls nahe an der Wanddickenrestriktion. Hierdurch reduziert sich zudem die Anzahl der benötigten Funktionsaufrufe in den inneren Optimierungsschleifen zur Evaluation neuer Entwürfe (vgl. Tabelle 6–6).

Der finale Entwurf der GHT für diese Optimierungsaufgabe wird durch ein sequenzielles Anwenden der folgenden Heuristiken gefunden:

1. *Insert Small Chambers* (Iteration 5)

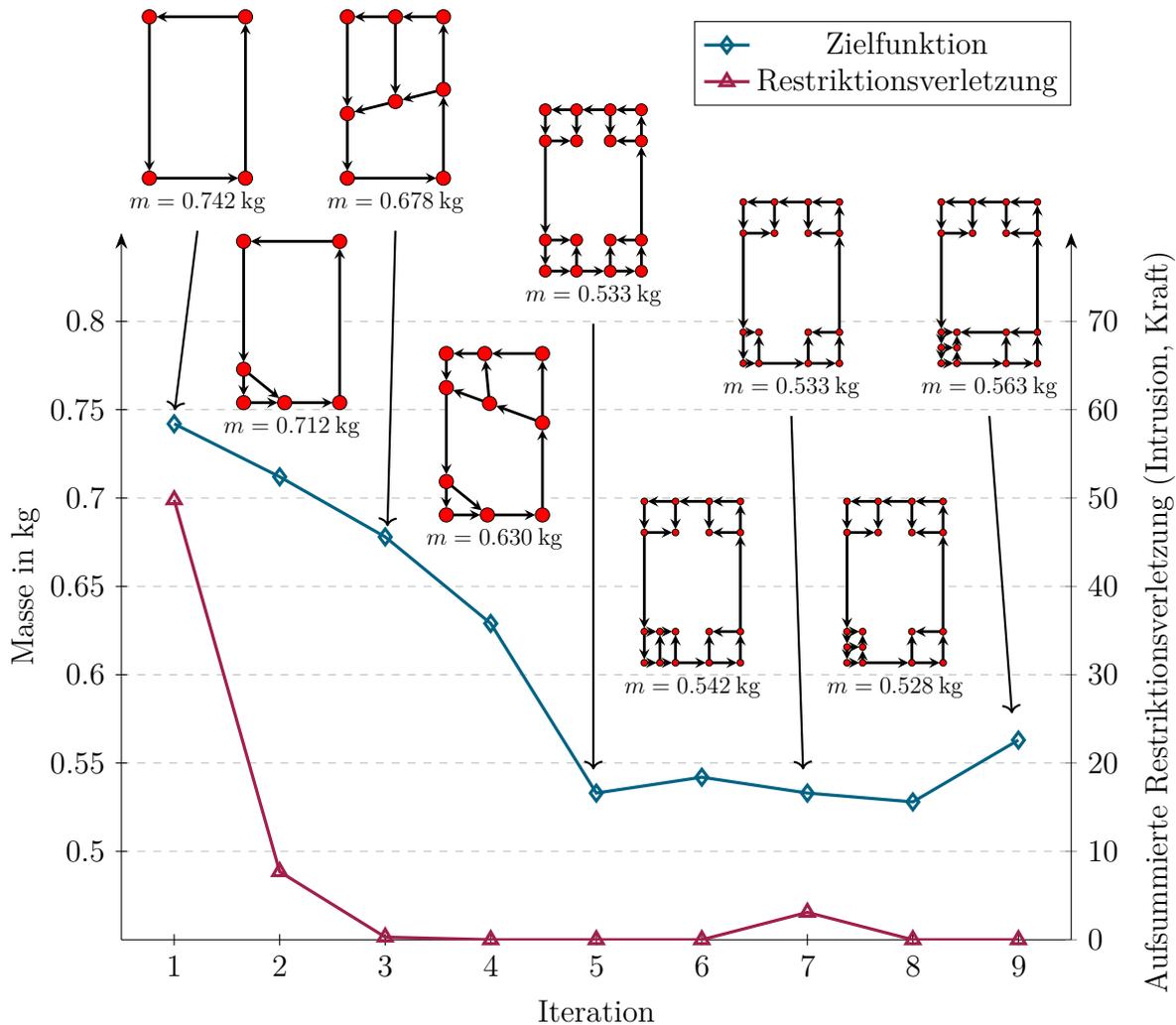


Abbildung 6–20: Entwicklung der Zielfunktion und der Restriktionsverletzung über die Iterationen der äußeren Optimierungsschleife für den jeweils besten Entwurf einer Iteration (Anwendungsbeispiel 2b: *Minimierung der Masse*)

2. *Connect Low Energy Walls*
3. *Delete Needless Walls*
4. *Connect Low Energy Walls*

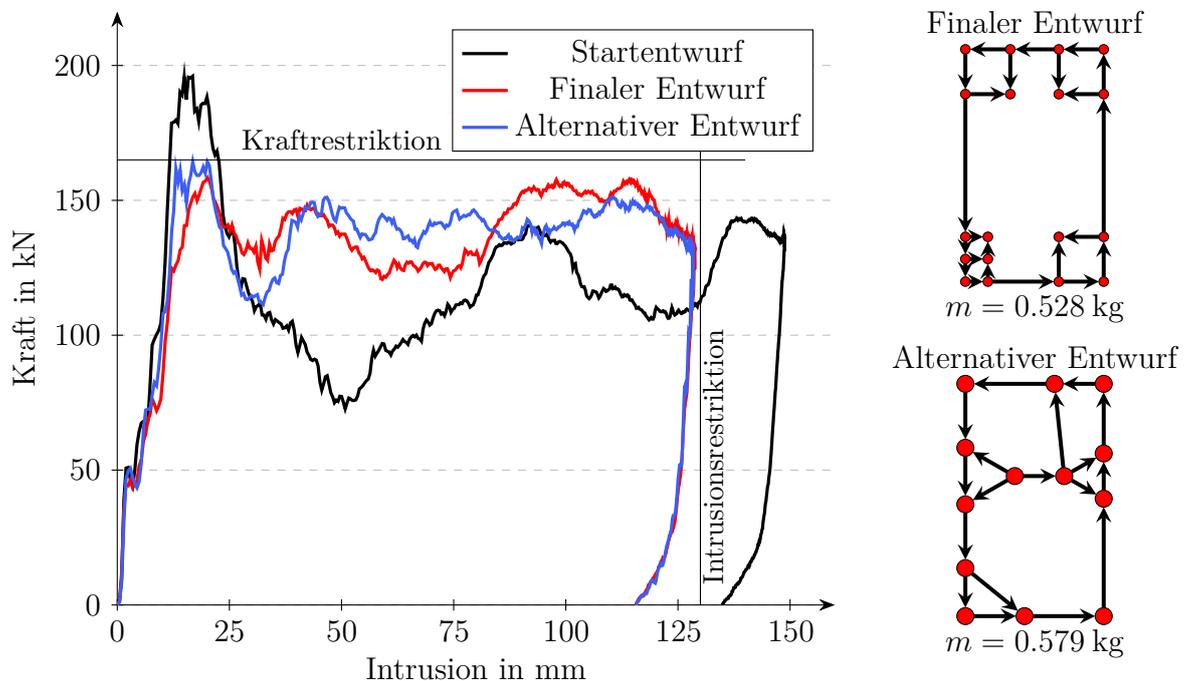
Er basiert somit auf der Heuristik *Insert Small Chambers*, verfügt jedoch über eine kleine Doppelkammer in der linken unteren Ecke, was einer zusätzlichen Versteifung dieser Ecke entspricht. Abbildung 6–21 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf sowie den Graphen des finalen Entwurfs. Abbildung 6–22 zeigt das Deformationsbild im vorgegebenen Lastfall. Die Crashbox verfügt über jeweils eine Wandverprägung auf den längsten Wänden der Crashbox-Seiten. Neben dem finalen Entwurf verfügen

Tabelle 6–6: Optimierungshistorie für Anwendungsbeispiel 2b: *Minimierung der Masse*

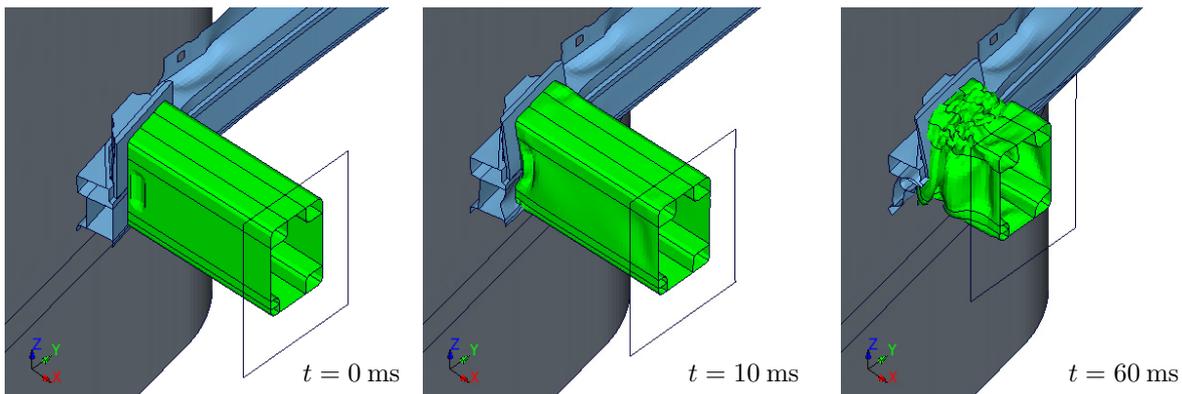
	Bester Entwurf jeder Iteration			Heuristik*	Funktionsaufrufe
	m in kg	F_{\max} in kN	d_{\max} in mm		
Iteration 1 (Startentwurf)	0.7422	196.0	148.8	-	1
Iteration 2	0.7123	167.5	135.2	UDST	26
Iteration 3	0.6780	163.6	130.3	BED	108
Iteration 4	0.6295	160.6	129.0	SLW	157
Iteration 5	0.5328	160.6	129.3	ISC	168
Iteration 6	0.5423	161.9	128.1	CLEW	84
Iteration 7	0.5328	159.8	133.1	DNW	68
Iteration 8 (Finaler Entwurf)	0.5280	158.4	128.7	CLEW	82
Iteration 9	0.5631	163.1	120.5	UDST	74

*Letzte für den besten Entwurf aktiv gewordene Heuristik zur Topologieänderung

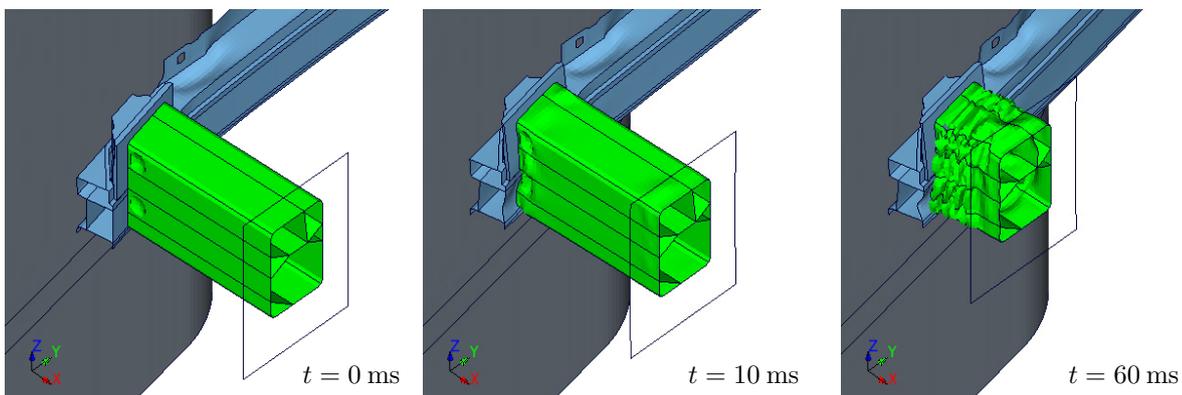
zudem viele der anderen Entwürfe, welche auf dem Entwurf der Heuristik *Insert Small Chambers* basieren, über eine ähnlich geringe Masse.

**Abbildung 6–21:** Kontaktkraft-Intrusions-Kurven für den Startentwurf, den finalen Entwurf und einen alternativen Entwurf aus Anwendungsbeispiel 2b:

Minimierung der Masse



(a) Finaler Entwurf aus Anwendungsbeispiel 2b: *Minimierung der Masse*



(b) Alternativer Entwurf aus Anwendungsbeispiel 2b: *Minimierung der Masse*

Abbildung 6–22: Deformationsbilder der linken Crashbox zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Längsträger und Schottblech sind ausgeblendet)

Neben dem finalen Entwurf, welcher auf einem Entwurf der Heuristik *Insert Small Chambers* beruht, soll an dieser Stelle der nächst beste Entwurf aus einem anderen Optimierungszweig (alternativer Entwurf) zum Vergleich herangezogen werden. Dieser wird in Iteration 6 gefunden und basiert auf einer sequenziellen Anwendung der folgenden Heuristiken:

1. *Use Deformation Space Tension*
2. *Support Buckling Walls*
3. *Use Deformation Space Compression*
4. *Counter Global Bending Y-Support*
5. *Counter Global Bending V-Support*

Der alternative Entwurf stützt sich stärker am oberen Bereich des Querträgers, welcher zusätzlich durch ein Gussbauteil versteift ist, ab und weist unterschiedliche Wandlängen auf. Ebenfalls verfügt er über kleine Kammern. Die Wanddicke

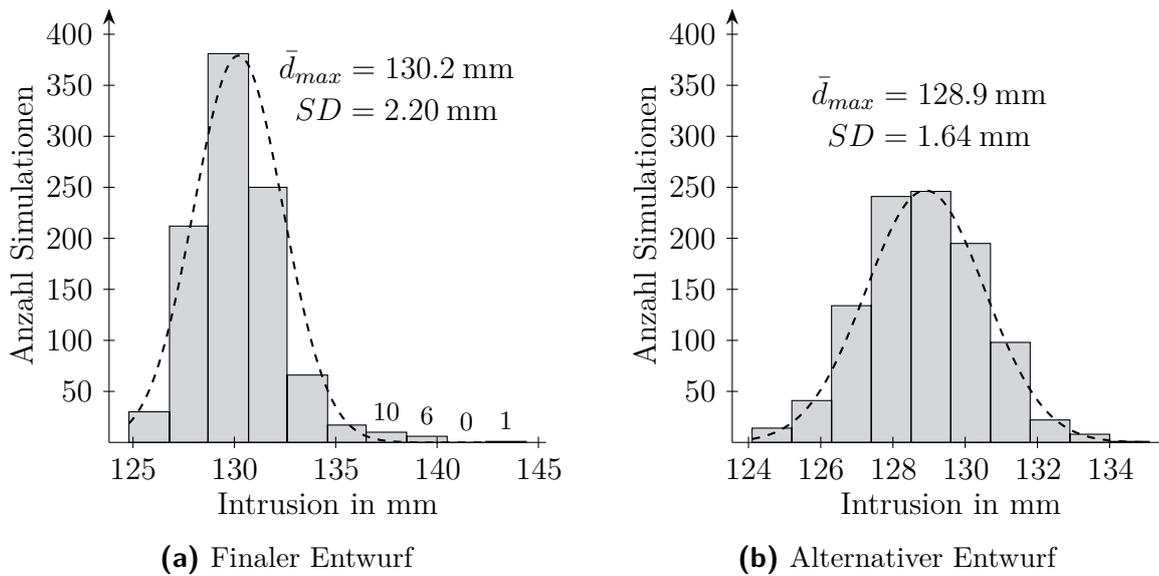
beträgt $t = 1.6$ mm. Bedeutend ist, dass dieser Entwurf 10 % schwerer ist als der finale Entwurf der Optimierung und somit signifikant schlechter hinsichtlich der Zielfunktion. Das untermauert wiederum die Ergebnisse aus den Literaturuntersuchungen sowie aus Abschnitt 6.1, dass der Ansatz, kleine Kammern in die Ecken eines axial belasteten Extrusionsprofils einzubringen, überlegene spezifische Energieabsorptionseigenschaften aufweist.

Tabelle 6–7: Parameter der Robustheitsabschätzung mit Standardabweichung (SD) der Normalverteilung

Geometrie-Parameter	Standardabweichung
x bzw. y-Koordinaten der LINK-Knoten	$SD_{xy} = 0.5$ mm
Wanddicke	$SD_t = 0.05$ mm
Triggerposition	$SD_p = 2.5$ mm
Triggertiefe	$SD_d = 0.5$ mm

Für die beiden beschriebenen Entwürfe aus der Optimierungsaufgabe *Minimierung der Intrusion* wird eine exemplarische Robustheitsabschätzung durchgeführt. Das Hauptziel ist dabei eine Untersuchung des Einflusses streuender Geometrieparameter, welche beispielsweise aufgrund von Fertigungstoleranzen im Strangpressprozess auftreten können, auf die Strukturantworten und insbesondere auf die Deformationsform. Weitere Größen wie beispielsweise der Barrierewinkel werden nicht gestreut, um den Einfluss der Geometrieparameter der Crashbox zu isolieren. Die Crashboxen sollen bei streuenden Geometrieparametern ein ähnliches Deformationsverhalten zeigen und folglich insbesondere nicht mittels globaler Biegung deformieren. Die Geometrieparameter werden mit einer Normalverteilung gestreut. In jeder Robustheitsabschätzung werden 1000 Crashsimulationen durchgeführt. Die Geometrieparameter mit ihren Standardabweichungen sind in Tabelle 6–7 dargestellt. Die Werte für die Standardabweichungen sind Annahmen.

Abbildung 6–23 zeigt die Ergebnisse der Robustheitsabschätzung. Im Histogramm für die Intrusionen des finalen Entwurfs (vgl. Abbildung 6–23 (b)) sind jedoch Ausreißer in Richtung der höheren Intrusionen ersichtlich. Bei einer Betrachtung des Deformationsverhaltens dieser Ausreißer ($d_{max} > 135$ mm) können Entwürfe identifiziert werden, die mittels globaler Biegung (in Kombination mit Faltenbeulen) deformieren. Exemplarisch ist dieses Verhalten für den Entwurf mit der höchsten Intrusion in Abbildung 6–24 dargestellt. Im Gegensatz dazu können für den alternativen Entwurf nur Simulationen mit Faltenbeulen identifiziert werden. Es kann somit geschlussfolgert werden, dass der alternative Entwurf über eine höhere



Entwurf	Funktion	\bar{x}	SD
Finaler Entwurf	F in kN	161.8	2.97
	d_{max} in mm	130.2	2.20
Alternativer Entwurf	F in kN	166.7	2.47
	d_{max} in mm	128.9	1.64

(c) Mittelwerte (\bar{x}) und Standardabweichungen (SD) für die *Kontaktkraft* und *Intrusion*

Abbildung 6–23: Ergebnis der Robustheitsabschätzung für zwei ausgewählte Entwürfe aus Anwendungsbeispiel 2b: *Minimierung der Masse*

Robustheit hinsichtlich der Streuung der Geometrieparameter verfügt. Für die Verbesserung der Robustheit muss jedoch ein höheres Gewicht akzeptiert werden.

6.2.4 Diskussion der Ergebnisse

Die vorgestellte Topologieoptimierung einer Crashbox zeigt die erfolgreiche Anwendung der entwickelten Methodik in einem industriellen Anwendungsbeispiel. In beiden Optimierungsaufgaben konnten signifikante Verbesserungen der Zielfunktionen erreicht werden. Zudem wurden die Restriktionsverletzungen sukzessive über die Iterationen reduziert. Hervorzuheben ist zudem das annähernd konstante Kraftniveau beim finalen Entwurf der Optimierungsaufgabe *Minimierung der maximalen Kontaktkraft*.

Für die besten Entwürfe beider Optimierungsaufgaben haben jeweils laterale und axiale Heuristiken zusammengewirkt, was die Entscheidung bestärkt, die

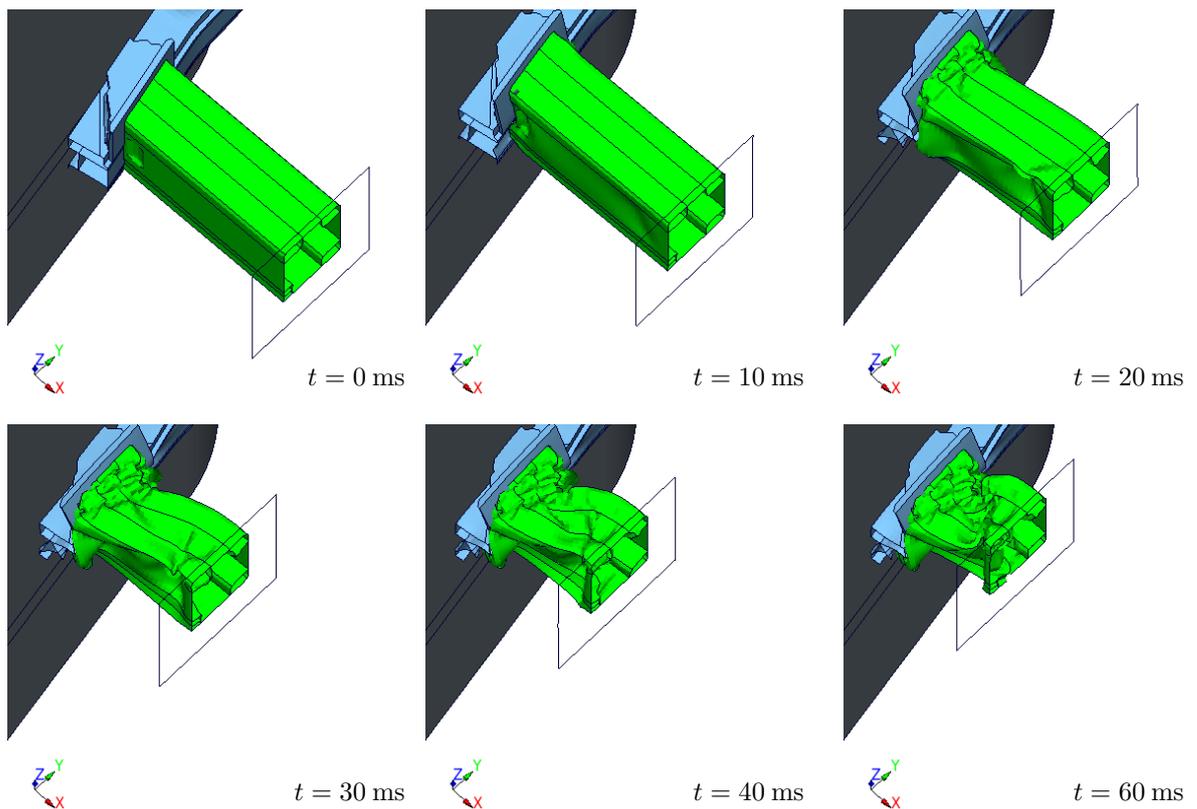


Abbildung 6–24: Deformationsbilder der linken Crashbox zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit globaler Biegung für die Variante mit der höchsten Intrusion ($d_{max} = 144.4$ mm) im Rahmen der Robustheitsabschätzung aus Anwendungsbeispiel 2b: *Minimierung der Masse* (Längsträger und Schottblech sind ausgeblendet)

bekanntem Heuristiken weiter zur Optimierung axial belasteter Crashstrukturen zu verwenden. Zudem konnten die Untersuchungen das erfolgreiche Zusammenspiel der Heuristiken zur Topologieoptimierung und der Triggerheuristik *Enforce Deformation Start Point* aufzeigen. Trotz der großen Anzahl an angewendeten Heuristiken bleibt die Anzahl der benötigten Funktionsaufrufe in einem akzeptablen Rahmen für industrielle Anwendungen.

Insbesondere in der Optimierungsaufgabe *Minimierung der maximalen Kontaktkraft* zeigt sich, dass der Optimierungsalgorithmus implizit die strukturellen Eigenschaften und Geometrien der umliegenden Komponenten mit berücksichtigt und Topologien findet, welche dieses Umfeld ausnutzen können. Die Robustheitsabschätzung zur Optimierungsaufgabe *Minimierung der Masse* zeigt einen weiteren Vorteil des Optimierungsansatzes der GHT auf. Durch die Verfolgung einer Vielzahl von unterschiedlichen Entwürfen, die sich in ihrer Topologie und Form unterscheiden, ist es möglich, mehrere lokale Optima für eine detailliertere, nachgeschaltete Untersuchung, z.B. in einer Robustheitsuntersuchung oder für die Absicherung

in weiteren Lastfällen zu verwenden. Zudem können bei der Betrachtung der lokalen Optima weitere Kriterien für die Auswahl eines Entwurfs mit einbezogen werden, welche sich schwer in mathematische Restriktions- oder Zielfunktionen formulieren lassen. Ein Beispiel hierfür ist die Abwägung zwischen einer höheren Fertigungskomplexität, welche sich oft in den Bauteilkosten, aber nur in geringen Verbesserungen der Zielfunktion, z.B. der Bauteilmasse, niederschlägt.

Auf eine umfangreiche Formoptimierung und Dimensionierung für den finalen Entwurf der GHT wurde bei den vorliegenden Optimierungen verzichtet. Üblicherweise können hierbei weitere Potenziale gehoben werden. In der Regel geht das jedoch zu Lasten der Effizienz hinsichtlich der benötigten Anzahl an Funktionsaufrufen. Vor der Durchführung einer ressourcenintensiven Formoptimierung und Dimensionierung erscheint zudem eine vorgeschaltete manuelle Bewertung durch den Anwender zielführend.

In dem vorliegenden Anwendungsbeispiel wurde auf die gleichzeitige Betrachtung mehrerer Lastfälle verzichtet. Eine Berücksichtigung mehrerer Lastfälle ist in der GHT jedoch möglich. Bei der Topologieoptimierung von Crashstrukturen, welche einen bedeutenden Einfluss auf das Crashverhalten in mehreren unterschiedlichen Lastfällen haben, ist es grundsätzlich ratsam, verschiedene Lastfälle in die Optimierung mit einzubeziehen, um alle relevanten Anforderungen direkt in der Optimierung berücksichtigen zu können.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Dissertation wurde eine Methodik zur Topologieoptimierung axial belasteter Crashstrukturen entwickelt. Sie basiert auf der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung (GHT), welche standardmäßig für lateral belastete Crashstrukturen eingesetzt wird. Wesentliche Charakteristiken der Optimierungsmethodik sind eine graphenbasierte Beschreibung der Querschnittsgeometrie sowie die Modifikation der Topologie mit aus Expertenwissen abgeleiteten Heuristiken. Zudem wird das Optimierungsproblem in eine äußere und eine innere Optimierungsschleife aufgeteilt. In der äußeren Optimierungsschleife werden die heuristikbasierten Topologiemodifikationen durchgeführt. Dabei werden konkurrierende Entwürfe mit unterschiedlichen Querschnittsgeometrien verfolgt. In der inneren Optimierungsschleife kann eine Formoptimierung und/oder Dimensionierung durchgeführt werden. Hierfür werden konventionelle Optimierungsalgorithmen eingesetzt. In der inneren Optimierungsschleife finden zudem die Funktionsaufrufe der Optimierungsmethode statt, welche üblicherweise Crashsimulationen sind.

Da axial crashbelastete Profilstrukturen besonders sensitiv hinsichtlich kleiner Modellierungsunterschiede in den FE-Modellen sind, wurde zunächst der Prozess zur automatischen und graphenbasierten Modellerzeugung erweitert. Neben einer Methode zur Berücksichtigung von zufälligen, fertigungsbedingten Imperfektionen der Profilgeometrie wurde zudem eine automatisierte Aufbringung von geometrischen Details stranggepresster Profilstrukturen integriert. Basierend auf Berechnungen am mathematischen Graphen werden dabei Verrundungen und Materialansammlungen an Wandknoten im Profilquerschnitt aufgebracht. In der industriellen Anwendung von axial belasteten Crashstrukturen sind zudem Triggermechanismen Stand der Technik, um ein robustes Strukturverhalten zu erreichen. Für eine Berücksichtigung im Optimierungsprozess werden die Triggermechanismen ebenfalls in den automatischen Modellbildungsprozess sowie parameterbasiert in die Graphensyntax integriert.

Kern der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung neuer Heuristiken, welche als Ziel die Verbesserung der Eigenschaften von axial crashbelasteten Profilstrukturen

hinsichtlich üblicher Bewertungskriterien haben. Zum einen wurden Heuristiken zur Verbesserung der Energieabsorptionseigenschaften vorgestellt. Diese Heuristiken haben das Ziel durch das Einbringen neuer Wände in den Querschnitt der Profilstruktur das Kraftniveau bzw. die spezifische Energieabsorption beim Faltenbeulen zu erhöhen oder durch geeignete topologische Maßnahmen gleichmäßigere Kraft-Weg-Verläufe zu erzeugen. Zudem wurden Ansätze zum robusten Initiieren und Aufrechterhalten von Faltenbeulen diskutiert. Auf Basis von Methoden zur Dimensionsreduktion analysieren diese Heuristiken das Deformationsverhalten der Profilstrukturen in den jeweils vorliegenden Crashlastfällen. Basierend darauf führen die Heuristiken geeignete Topologieänderungen, welche der Deformation mittels globaler Biegung entgegenwirken sollen, durch oder bringen Triggermechanismen auf die Profilstruktur auf.

Die Effizienz der Methodik wurde an zwei Anwendungsbeispielen untersucht. Als erstes Anwendungsbeispiel wurden umfangreiche Topologieoptimierungen an unterschiedlichen Profilstrukturen in einem Fallturm-Lastfall durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss verschiedener Außengeometrien und Belastungswinkel sowie von Symmetriestreiktionen auf die Ergebnisse der Topologieoptimierung untersucht. Zudem wurde die Leistungsfähigkeit der einzelnen Heuristiken zur Topologiemodifikation bewertet. Als zweites Anwendungsbeispiel wurde die Topologie einer Crashbox in einem Versicherungseinstufungstest optimiert. Beide Anwendungsbeispiele zeigen, dass die Methodik zur effizienten Verbesserung typischer Zielfunktionen wie der Intrusion, der maximalen Kontaktkraft oder der Strukturmasse genutzt werden kann. Die Anzahl der benötigten Funktionsaufrufe (in der Regel die Crashsimulationen aller berücksichtigten Lastfälle) bewegt sich dabei im Bereich zwischen 50 und 800 und somit in einem für industrielle Anwendungen vertretbaren Bereich. Zum Erreichen der jeweils besten Entwürfe wirken dabei in der Regel laterale und axiale Heuristiken zusammen. Für aus der Literatur als besonders effizient bekannte Topologien konnten in den Anwendungsbeispielen leistungsfähigere Alternativen gefunden werden. Für unterschiedliche Optimierungsprobleme, welche sich beispielsweise durch ihre Außengeometrien, Lastfälle, Materialien oder Fertigungsrandbedingungen unterscheiden, werden jeweils andere Profiltopologien als der jeweils beste Entwurf identifiziert. Wie bei anderen Topologieoptimierungsmethoden auch, handelt es sich dabei in der Regel um ein lokales Optimum.

Für die Topologieoptimierung von axial crashbelasteten Profilstrukturen, welche kinetische Energie mittels plastischer Deformation durch Faltenbeulen absorbieren, funktioniert dieser Ansatz effizient. Eine Anwendung der Heuristiken für die Topologieoptimierung von Profilstrukturen unter anders gearteten Crashlasten

(z.B. laterale crashbelastete Profilstrukturen) könnte für einzelne Heuristiken funktionieren. Jedoch sollten hierfür weitere detaillierte Untersuchungen folgen. Eine effiziente Anwendung der Heuristiken auf andere Bereiche der Strukturoptimierung (z.B. Maximierung der Steifigkeit in linear elastischen Lastfällen) ist eher unwahrscheinlich.

Zudem ist die Anwendung der Methodik bisher nur für die Topologieoptimierung von (metallischen) Profilstrukturen, welche mittels Strangpressen hergestellt werden können, erprobt. Eine Ausweitung auf andere Materialien oder Fertigungsverfahren ist jedoch wünschenswert. Für die Topologieoptimierung lateral belasteter Crashstrukturen wurden entsprechende Ansätze bereits vorgestellt (vgl. Abschnitt 2.4.5).

Eine weitere bisher nicht untersuchte Problemstellung ist die gleichzeitige Topologieoptimierung mehrerer Crashstrukturen. Aktuell ist die Methodik auf die Optimierung eines Bauteils beschränkt (z.B. Crashbox oder Längsträger). Die Möglichkeit der simultanen Topologieoptimierung einer Crashbox und eines daran anschließenden Längsträgers haben das Potenzial die Effizienz der Methode bei der Auslegung axial belasteter Crashstrukturen weiter zu steigern, da eine gegenseitige Abstimmung beider Komponenten innerhalb der Optimierung möglich wird.

Literaturverzeichnis

- Abramowicz W (2003) Thin-walled structures as impact energy absorbers. *Thin-Walled Structures* 41: 91–107
- Abramowicz W, Jones N (1986) Dynamic progressive buckling of circular and square tubes. *International Journal of Impact Engineering* 4: 243–270
- Abramowicz W, Jones N (1984a) Dynamic axial crushing of circular tubes. *International Journal of Impact Engineering* 2: 263–281
- Abramowicz W, Jones N (1984b) Dynamic axial crushing of square tubes. *International Journal of Impact Engineering* 2: 179–208
- Alavi Nia A, Fallah Nejad K, Badnava H, Farhoudi HR (2012) Effects of buckling initiators on mechanical behavior of thin-walled square tubes subjected to oblique loading. *Thin-Walled Structures* 59: 87–96
- Alavi Nia A, Parsapour M (2014) Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections. *Thin-Walled Structures* 74: 155–165
- Alexander JM (1960) An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics* 13: 10–15
- Alghamdi A (2001) Collapsible impact energy absorbers: An overview. *Thin-Walled Structures* 39: 189–213
- Altair (2019) *HyperWorks Desktop 2019.1 Release Notes*.
- Andrews K, England GL, Ghani E (1983) Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading. *International Journal of Mechanical Sciences* 25: 687–696
- Andricevic N (2016) Robustheitsbewertung crashbelasteter Fahrzeugstrukturen. Dissertation. Ernst-Mach-Institut.

- AUDI AG (2011) *Crashsicherheit: Lastpfade im Audi A8-Unterboden und Vorderwagen*. URL: <https://www.audi-technology-portal.de/de/karosserie/steifigkeit-crashsicherheit/crashsicherheit>.
- AUDI AG (2018) *Audi Q8: Karosserie*. URL: <https://www.audi-mediacyber.com/de/fotos/detail/audi-q8-62878>.
- Barényi B (1952) Kraftfahrzeug, insbesondere zur Beförderung von Personen. Pat. 854157.
- Baroutaji A, Sajjia M, Olabi AG (2017) On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments. *Thin-Walled Structures* 118: 137–163
- Beeh E (2015) Entwicklung einer neuartigen crashadaptiven Vorderwagenstruktur für Fahrzeuge mit alternativen Antriebsvarianten. Diss. Köln.
- Beer M, Liebscher M (2008) Designing robust structures – A nonlinear simulation based approach. *Computers & Structures* 86: 1102–1122
- Bendsøe MP, Sigmund O (2004) *Topology Optimization*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- BETA (2019) *ANSA version 21.1.X User Guide*.
- Beyer F, Schneider D, Schumacher A (2021) Finding three-dimensional layouts for crashworthiness load cases using the graph and heuristic based topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 63: 59–73
- Böhme M (2020) *Potentiale passiver Sicherheit in Frontalcrashes: Kopfbelastungen bei geringer und Vorderwagenoptimierung für große Überdeckung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Bujny M, Aulig N, Olhofer M, Duddeck F (2017) Identification of optimal topologies for crashworthiness with the evolutionary level set method. *International Journal of Crashworthiness* 23: 395–416
- Cavazzuti M, Baldini A, Bertocchi E, Costi D, Torricelli E, Moruzzi P (2011) High performance automotive chassis design: A topology optimization based approach. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 44: 45–56
- Chen G, Chen XM, Shi MF, Li W, Tyan T (2005) Experimental and Numerical Studies of Crash Trigger Sensitivity in Frontal Impact. In: *SAE 2005 World*

- Congress & Exhibition*. SAE Technical Paper Series. SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States.
- Chen S, Yu H, Fang J (2018) A novel multi-cell tubal structure with circular corners for crashworthiness. *Thin-Walled Structures* 122: 329–343
- Chen W, Wierzbicki T (2001) Relative merits of single-cell, multi-cell and foam-filled thin-walled structures in energy absorption. *Thin-Walled Structures* 39: 287–306
- Deutscher Verkehrssicherheitsrat, Hrsg. (2012) *Vision Zero: Grundlagen & Strategien*. Bonn. URL: <https://www.dvr.de/fileadmin/downloads/dvr-schriftenreihe/Schriftenreihe-Verkehrssicherheit-16.pdf>.
- Diez C (2019) *Process for Extraction of Knowledge from Crash Simulations by means of Dimensionality Reduction and Rule Mining*. Universitätsbibliothek Wuppertal, Wuppertal.
- DiPaolo BP, Tom JG (2006) A study on an axial crush configuration response of thin-wall, steel box components: The quasi-static experiments. *International Journal of Solids and Structures* 43: 7752–7775
- Du Bois P, Chou CC, Fileta BB, Khalil TB, King AI, Mahmood HF, Mertz HJ, Wisnans J (2004) *Vehicle Crashworthiness and Occupant Protection*. American Iron and Steel Institute.
- Duddeck F, Hunkeler S, Lozano P, Wehrle E, Zeng D (2016) Topology optimization for crashworthiness of thin-walled structures under axial impact using hybrid cellular automata. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 54: 415–428
- Duddeck F, Volz K (2012) A new Topology Optimization Approach for Crashworthiness of Passenger Vehicles Based on Physically Defined Equivalent Static Loads. In: *Int. Crashworthiness Conf. (ICrash)*.
- El-Hage H, Mallick PK, Zamani N (2005) A numerical study on the quasi-static axial crush characteristics of square aluminum tubes with chamfering and other triggering mechanisms. *International Journal of Crashworthiness* 10: 183–196
- ESI (2018) *Virtual Performance Solution 2018.02 - Reference Manual*. URL: <https://myesi.esi-group.com/downloads/software-documentation/virtual-performance-solution-2018.02-reference-manual-online>.

- Euro NCAP (2019a) *Assessment Protocol - Adult Occupant Protection: Version 9.1.1*. URL: <https://cdn.euroncap.com/media/57827/euro-ncap-assessment-protocol-aop-v911.pdf>.
- Euro NCAP (2019b) *Full width frontal impact testing protocol: Version 1.2*. URL: <https://cdn.euroncap.com/media/53141/euro-ncap-frontal-fw-test-protocol-v12.pdf>.
- Euro NCAP (2019c) *MPDB frontal impact testing protocol: Version 1.1.1*. URL: <https://cdn.euroncap.com/media/55858/euro-ncap-mpdb-testing-protocol-v111.pdf>.
- Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union (17.04.2019) *Verordnung (EU) 2019/631 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. April 2019 zur Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011 (Neufassung): Verordnung (EU) 2019/631*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:02019R0631-20210301&from=EN>.
- European Commission, Hrsg. (2019) *EU Road Safety Policy Framework 2021-2030 - Next steps towards "Vision Zero": Commission staff working document*. URL: https://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/default/files/move-2019-01178-01-00-en-tra-00_3.pdf.
- Fang J, Gao Y, Sun G, Qiu N, Li Q (2015) On design of multi-cell tubes under axial and oblique impact loads. *Thin-Walled Structures* 95: 115–126
- Fang J, Sun G, Qiu N, Kim NH, Li Q (2017) On design optimization for structural crashworthiness and its state of the art. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 55: 1091–1119
- Friedrich HE (2017) *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Fyllingen Ø, Hopperstad OS, Langseth M (2007) Stochastic simulations of square aluminium tubes subjected to axial loading. *International Journal of Impact Engineering* 34: 1619–1636
- Fyllingen Ø, Langmoen EC, Langseth M, Hopperstad OS (2012) Transition from progressive buckling to global bending of square aluminium tubes. *International Journal of Impact Engineering* 48: 24–32

- GNS (2020) *Animator4 User Guide*.
- Han DC, Park SH (1999) Collapse behavior of square thin-walled columns subjected to oblique loads. *Thin-Walled Structures* 35: 167–184
- Hill R (1952) On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 1: 19–30
- Hoffmann R, Reuter R (2018) *SafetyCompanion 2019*. Alzenau.
- Hunkeler S (2014) Topology Optimisation in Crashworthiness Design via Hybrid Cellular Automata for Thin Walled Structures. PhD Thesis. London, United Kingdom: Queen Mary University of London.
- Jones N (2012) *Structural impact*. Second edition. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jusuf A, Dirgantara T, Gunawan L, Putra IS (2015) Crashworthiness analysis of multi-cell prismatic structures. *International Journal of Impact Engineering* 78: 34–50
- Kacprzyk J, Koziel S, Yang XS (2011) *Computational Optimization, Methods and Algorithms*. Bd. 356. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Kim HS (2002) New extruded multi-cell aluminum profile for maximum crash energy absorption and weight efficiency. *Thin-Walled Structures* 40: 311–327
- Kirkpatrick SW, Schroeder M, Simons JW (2010) Evaluation of passenger rail vehicle crashworthiness. *International Journal of Crashworthiness* 6: 95–106
- Kitagawa Y, Hagiwara I, Tsuda M (1991) Development of a Collapse Mode Control Method for Side Members in Vehicle Collisions. In: *International Congress & Exposition*. SAE Technical Paper Series. SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States.
- Klein B (2015) *FEM*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Kohar CP, Zhumagulov A, Brahme A, Worswick MJ, Mishra RK, Inal K (2016) Development of high crush efficient, extrudable aluminium front rails for vehicle lightweighting. *International Journal of Impact Engineering* 95: 17–34
- Kramer F, Franz U, Lorenz B, Remfrey J, Schöneburg R (2013) *Integrale Sicherheit von Kraftfahrzeugen*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.

- Kröger M (2002) *Methodische Auslegung und Erprobung von Fahrzeug-Crashstrukturen: Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2001*. Als Ms. gedr. Bd. 496. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik. VDI-Verl., Düsseldorf.
- Langseth M, Hopperstad OS (1996) Static and dynamic axial crushing of square thin-walled aluminium extrusions. *International Journal of Impact Engineering* 18: 949–968
- Lee HA, Park GJ (2015) Nonlinear dynamic response topology optimization using the equivalent static loads method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 283: 956–970
- Lee S, Hahn C, Rhee M, Oh JE (1999) Effect of triggering on the energy absorption capacity of axially compressed aluminum tubes. *Materials & Design* 20: 31–40
- Link S, Schneider D, Schumacher A, Ortman C (2019) Integration of Flange Connections in the Graph and Heuristic Based Topology Optimization of Crashworthiness Structures. In: *EngOpt 2018 Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Optimization*. Hrsg. von Rodrigues HC et al. Springer International Publishing, Cham: 619–631.
- Lönn D, Fyllingen Ø, Nilsson L (2010) An approach to robust optimization of impact problems using random samples and meta-modelling. *International Journal of Impact Engineering* 37: 723–734
- LSTC (2016) *LS-DYNA Keyword User's Manual*. URL: https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna-manual-r9.0-vol-i/@download/file/LS-DYNA_Manual_Volume_I_R9.0.pdf.
- Meywerk M (2007) *CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Mital A, Desai A, Subramanian A, Mital A (2014) *Product Development: A Structured Approach to Consumer Product Development, Design, and Manufacture*. 2nd ed. Elsevier Science, Burlington.
- Mou H, Xie J, Feng Z (2020) Research status and future development of crashworthiness of civil aircraft fuselage structures: An overview. *Progress in Aerospace Sciences* 119: 100644
- Najafi A, Rais-Rohani M (2011) Mechanics of axial plastic collapse in multi-cell, multi-corner crush tubes. *Thin-Walled Structures* 49: 1–12

- NHTSA (2020) *Traffic Safety Facts 2018 annual report: A Compilation of Motor Vehicle Crash Data (Report No. DOT HS 812 981)*. National Highway Traffic Safety Administration, Washington DC.
- Olschinka C, Schumacher A (2008) Graph Based Topology Optimization of Crashworthiness Structures. *PAMM* 8: 10029–10032
- Ortmann C (2015) Entwicklung eines graphen- und heuristikbasierten Verfahrens zur Topologieoptimierung von Profilquerschnitten für Crashlastfälle. Dissertation.
- Ortmann C, Schumacher A (2013) Graph and heuristic based topology optimization of crash loaded structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 47: 839–854
- Ortmann C, Sperber J, Schneider D, Link S, Schumacher A (2021) Crashworthiness design of cross-sections with the Graph and Heuristic based Topology Optimization incorporating competing designs. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 71: 197
- Ostermann F (2014) *Anwendungstechnologie Aluminium*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Paik JK (2003) Innovative Structural Designs of Tankers Against Ship Collisions and Grounding: A Recent State-of-the-Art Review. *Marine Technology and SNAME News* 40: 25–33
- Park GJ (2011) Technical overview of the equivalent static loads method for non-linear static response structural optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 43: 319–337
- Patel NM (2007) Crashworthiness Design using Topology Optimization. Doctoral Dissertation. USA: University of Notre Dame.
- Patel NM, Kang BS, Renaud JE, Tovar A (2009) Crashworthiness Design Using Topology Optimization. *Journal of Mechanical Design* 131: 485
- Pedersen C (2003) Topology optimization design of crushed 2D-frames for desired energy absorption history. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 25: 368–382

- Pedersen CB (2004) Crashworthiness design of transient frame structures using topology optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 193: 653–678
- Pirmohammad S, Marzdashti SE (2016) Crushing behavior of new designed multi-cell members subjected to axial and oblique quasi-static loads. *Thin-Walled Structures* 108: 291–304
- Rat der Europäischen Union (29.03.2019) *EU verschärft die Anforderungen an die Kraftfahrzeugsicherheit*. URL: <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2019/03/29/eu-beefs-up-requirements-for-car-safety/>.
- RCAR (2017) *RCAR Low-speed structural crash test protocol: Issue 2.3*. URL: https://www.rcar.org/Papers/Procedures/RCAR%20Structure%20Test%20procedure%20Version%202_3.pdf#zoom=80%.
- Ren-Jye Yang, Akkerman A, Anderson DF, Faruque OM, Lei Gu (2000) Robustness optimization for vehicular crash simulations. *Computing in Science & Engineering* 2: 8–13
- Reyes A, Langseth M, Hopperstad OS (2002) Crashworthiness of aluminum extrusions subjected to oblique loading: Experiments and numerical analyses. *International Journal of Mechanical Sciences* 44: 1965–1984
- Reyes A, Langseth M, Hopperstad OS (2003) Square aluminum tubes subjected to oblique loading. *International Journal of Impact Engineering* 28: 1077–1106
- Rossi A, Fawaz Z, Behdinan K (2005) Numerical simulation of the axial collapse of thin-walled polygonal section tubes. *Thin-Walled Structures* 43: 1646–1661
- Rust W (2016) *Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Schenk CA, Schuëller GI (2003) Buckling analysis of cylindrical shells with random geometric imperfections. *International Journal of Non-Linear Mechanics* 38: 1119–1132
- Schmit LA, Mallett RH (1963) Structural Synthesis and Design Parameter Hierarchy. *Journal of the Structural Division* 89: 269–299
- Schneider D, Link S, Schumacher A, Ortmann C (2018) *Graph and Heuristic Based Topology Optimization of Crashworthiness Composite Profile Structu-*

- res Manufactured by Vacuum Infusion and Gluing*. 13th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XIII) und 2nd Pan American Congress on Computational Mechanics (PANACM II), New York City, USA.
- Schneider D, Schumacher A (2018) Finding Optimized Layouts for Ribs on Surfaces Using the Graph and Heuristic Based Topology Optimization. In: *Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization*. Hrsg. von Schumacher A et al. Springer International Publishing, Cham: 1615–1628.
- Schriever T (1990) *Zur nichtlinearen Finite-Element-Analyse des Verformungsverhaltens von Fahrzeuglängsträgern mit gezielt eingebrachten geometrischen Imperfektionen*. 1. Aufl. Bd. 20. Schriftenreihe Automobiltechnik. Forschungsges. Kraftfahrwesen, Aachen.
- Schumacher A (2020) *Optimierung mechanischer Strukturen*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Schwanitz P (2016) Robuste Optimierung und Bewertung von parametrisch modellierten Crashboxen. Dissertation. Berlin: Technische Universität Berlin.
- Shinozuka M, Deodatis G (1996) Simulation of Multi-Dimensional Gaussian Stochastic Fields by Spectral Representation. *Applied Mechanics Reviews* 49: 29–53
- Sperber J, Ortman C, Schumacher A (2019) Optimal application of triggers for the deformation of crash structures under axial compression with consideration of geometrical imperfections. In: *Proc 13th World Congr Struct Multidisc Optim (WCSMO13)*.
- Sperber J, Banda EB, Ortman C, Schumacher A (2021) Graph Based Algorithms to Enhance Mid-Surface Design Fidelity of Finite Element Models of Extrusion Profiles. In: *Technologies for economic and functional lightweight design*. Hrsg. von K Dröder, T Vietor. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg: 366–382.
- Stander N, Craig KJ (2002) On the robustness of a simple domain reduction scheme for simulation-based optimization. *Engineering Computations* 19: 431–450
- Stander N, Roux W, Basudhar A, Eggleston T, Goel T, Craig K (2015) *LS-OPT User's Manual - Version 5.2: A design optimization and probabilistic analysis tool for the engineering analyst*. URL: http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/lsopt/lsopt_52_manual.pdf.

- Stefanou G, Papadrakakis M (2004) Stochastic finite element analysis of shells with combined random material and geometric properties. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 193: 139–160
- Stjepandić J, Wognum N, J.C. Verhagen W (2015) *Concurrent Engineering in the 21st Century*. Springer International Publishing, Cham.
- Stolpe M, Verbart A, Rojas-Labanda S (2018) The equivalent static loads method for structural optimization does not in general generate optimal designs. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 58: 139–154
- Stören S, Rice JR (1975) Localized necking in thin sheets. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 23: 421–441
- Sun G, Liu T, Fang J, Steven GP, Li Q (2018) Configurational optimization of multi-cell topologies for multiple oblique loads. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 57: 469–488
- Tarlochan F, Samer F, Hamouda A, Ramesh S, Khalid K (2013) Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces. *Thin-Walled Structures* 71: 7–17
- Thakur A, Banerjee AG, Gupta SK (2009) A survey of CAD model simplification techniques for physics-based simulation applications. *Computer-Aided Design* 41: 65–80
- 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. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 63: 2705–2720
- Wagner M (2019) *Lineare und nichtlineare FEM*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Weider K, Schumacher A (2019) Adjoint Method for Topological Derivatives for Optimization Tasks with Material and Geometrical Nonlinearities. In: *EngOpt 2018 Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Optimization*. Hrsg. von Rodrigues HC et al. Springer International Publishing, Cham: 867–878.
- Wellkamp P (2019) *Prognosegüte von Crashberechnungen*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.

- WHO (2018) *Global status report on road safety 2018*. World Health Organization, Geneva.
- Witowski K, Müllerschön H, Erhart A, Schumacher P, Anakiev K (2014) *Topology and Topometry Optimization of Crash Applications with the Equivalent Static Load Method*. 13th Int. LS-DYNA Users Conference, Dearborn, USA.
- Witteman WJ (1999) Improved vehicle crashworthiness design by control of the energy absorption for different collision situations. Dissertation. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- Wolpert DH, Macready WG (1997) No free lunch theorems for optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 1: 67–82
- Yuen SCK, Nurick GN (2008) The Energy-Absorbing Characteristics of Tubular Structures With Geometric and Material Modifications: An Overview. *Applied Mechanics Reviews* 61: 1
- Zeng D (2019) Enhanced hybrid cellular automata method for crashworthiness topology optimization of thin-walled structures. Dissertation.
- Zeng D, Duddeck F (2017) Improved hybrid cellular automata for crashworthiness optimization of thin-walled structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 56: 101–115
- Zhang X, Cheng G (2007) A comparative study of energy absorption characteristics of foam-filled and multi-cell square columns. *International Journal of Impact Engineering* 34: 1739–1752
- Zhang X, Cheng G, Zhang H (2006) Theoretical prediction and numerical simulation of multi-cell square thin-walled structures. *Thin-Walled Structures* 44: 1185–1191
- Zhang X, Wen Z, Zhang H (2014) Axial crushing and optimal design of square tubes with graded thickness. *Thin-Walled Structures* 84: 263–274
- Zhang X, Zhang H (2013) Energy absorption of multi-cell stub columns under axial compression. *Thin-Walled Structures* 68: 156–163
- Zhang X, Zhang H (2014) Axial crushing of circular multi-cell columns. *International Journal of Impact Engineering* 65: 110–125

Alle Internetquellen wurden zuletzt am 12.09.2021 aufgerufen.

Anhang A

Studentische Arbeiten

Studentische Arbeiten haben zu verschiedenen Teilen dieser Dissertation beigetragen. Dominik Schneider entwickelte im Rahmen eines Ingenieurprojekts den Algorithmus für die Heuristik *Split Long Walls* (vgl. auch (Beyer et al. 2021)) und formulierte erste Umsetzungsideen für die Heuristiken *Insert Small Chambers* und *Create Different Wall Lengths*. Winnie Teichmann entwickelte in seiner Bachelorarbeit das FE-Vernetzungsprogramm SpEx. Johannes Lüke untersuchte in seiner Masterarbeit die Einflüsse von geometrischen Imperfektionen und Triggern auf das Deformationsverhalten von axial belasteten Crashstrukturen. Enrique Benavides Banda entwickelte in seiner Masterarbeit wichtige Teile der Heuristik *Counter Global Bending* (in der Masterarbeit *Support Global Stability* genannt). Die beiden letztgenannten Abschlussarbeiten wurden intensiv vom Autor der vorliegenden Dissertation betreut. Eine Übersicht ist in der folgenden Tabelle gegeben:

Autor	Titel der Arbeit	Art	Hochschule	Datum
Dominik Schneider	Implementierung einer Heuristik für axial belastete Extrusionsprofile aus Aluminium im Crash	Ingenieurprojekt	Bergische Universität Wuppertal	06.10.2016
Leon Winnie Teichmann	Entwicklung eines Finite Elemente Vernetzers für Extrusionsprofile entlang eines Splines	Bachelorarbeit	Bergische Universität Wuppertal	10.03.2017
Johannes Lüke	Untersuchung von numerischen und physikalischen Triggern für axialbelastete Crashstrukturen im Kontext der Strukturoptimierung	Masterarbeit	Technische Universität Braunschweig	05.05.2019
Enrique Benavides Banda	Development of a heuristic in the context of topology optimization to support global stability of crash structures under axial compression loads	Masterarbeit	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen	26.06.2020

Anhang B

Weitere Gleichungen zur Heuristik CGB

$$\overline{cog}_t = \frac{\sum_{i=0}^{N_s} cog_{i,t}}{N_s} \quad (\text{B-1})$$

mit

\overline{cog}_t Mittlere Position der Schwerpunkte

$cog_{i,t}$ Schwerpunkt der Finiten Elemente an einem Spline-Punkt

N_s Anzahl der Schwerpunkte

$$n_{z,t} = \frac{\overline{cog}_t - cog_{end,t}}{|\overline{cog}_t - cog_{end,t}|} \quad (\text{B-2})$$

mit

$n_{z,t}$ z-Achse des lokalen Koordinatensystems

$cog_{end,t}$ Schwerpunkt am Ende der Profilseite

$$\bar{R}_t = \frac{\sum_{i=0}^{N_s} d_{i,t}}{N_s} \quad \text{mit} \quad d_{i,t} = \frac{|(cog_{end,t} - cog_{i,t}) \times n_{z,t}|}{|n_{z,t}|} \quad (\text{B-3})$$

mit

\bar{R}_t Mittlere Ablenkung

$d_{i,t}$ Abstand eines Schwerpunkts zur lokalen z-Achse

$$\lambda_t = \frac{\sum_{i=0}^{N_s-1} l_{i,t}}{\sum_{i=0}^{N_s-1} l_{i,t_0}} \quad \text{mit} \quad l_{i,t} = |\text{cog}_{i+1,t} - \text{cog}_{i,t}| \quad (\text{B-4})$$

mit

λ_t Kompressionsfaktor

$\tilde{l}_{i,t}$ Euklidischer Abstand zwischen zwei Schwerpunkten

$$\tilde{R} = \sum_{t=0}^{N_t} \frac{\bar{R}_t}{\lambda_t} \quad (\text{B-5})$$

mit

\tilde{R} Mittlere gewichtete Ablenkung

$$\beta_B = \frac{N_B}{N_t} \tilde{R}_B \quad (\text{B-6})$$

mit

β_B Index eines Profilendes für die Auswahl der Referenzseite

N_B Anzahl der Auswahl dieser Profilseite als Referenzseite

B Index für die Profilseite ($B = 0$: Startseite; $B = 1$: Ende)

Die Gleichungen B-1 - B-6 entstammen der Masterarbeit von Enrique Benavides Banda (vgl. Anhang A).

Anhang C

Weitere Ergebnisse zu Kapitel 6

Tabelle C–1: Anwendungsbeispiel 1: Ergebnisse der Optimierungen (Teil 1/2)

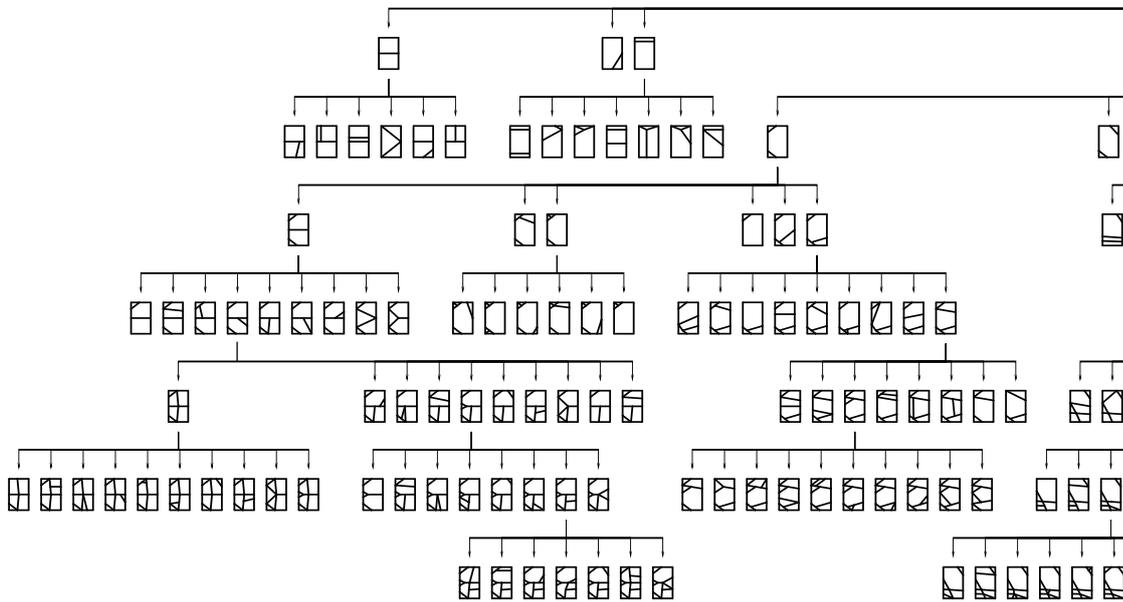
Außengeometrie	Impaktorkwinkel in °	Intrusion des initialen Entwurfs in mm	Intrusion des finalen Entwurfs in mm	Prozentuale Reduktion
qud	0	191.6	106.4	-44.5 %
	5	259.9	115.7	-55.5 %
	10	257.9	126.1	-51.1 %
	15	273.6	228.7	-16.4 %
	20	-	-	-
rct1	0	244.3	105.3	-56.9 %
	5	260.2	114.8	-55.9 %
	10	252.9	128.8	-49.1 %
	15	-	329.2	-
	20	-	-	-
rct2	0	244.4	105.4	-56.9 %
	5	261.1	115.5	-55.8 %
	10	260.9	122.9	-52.9 %
	15	267.3	228.8	-14.4 %
	20	-	-	-
rct3	0	248.6	110.9	-55.4 %
	5	258.4	114.7	-55.6 %
	10	272.0	142.9	-47.5 %
	15	-	-	-
	20	-	-	-
rct4	0	248.6	109.1	-56.1%
	5	251.9	114.4	-54.6 %
	10	253.5	115.0	-54.6 %
	15	259.0	194.6	-24.9 %
	20	293.1	293.1	0.0 %

Profilstrukturen ohne angegebenen Intrusionswert weisen globale Biegung auf.

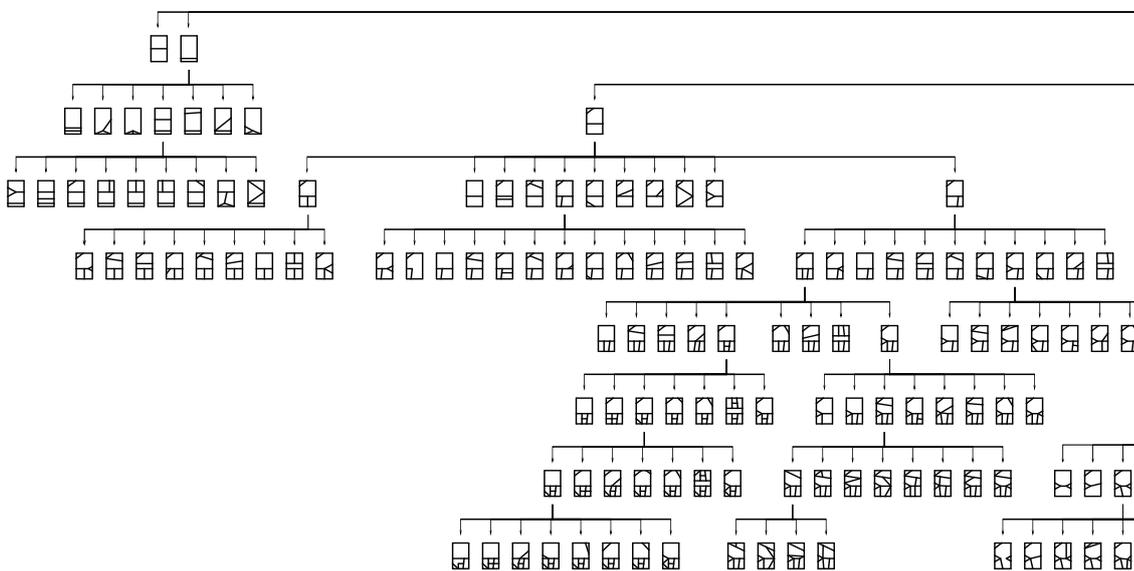
Tabelle C-2: Anwendungsbeispiel 1: Ergebnisse der Optimierungen (Teil 2/2)

Außengeo- metrie	Impaktor- winkel in °	Intrusion des initialen Entwurfs in mm	Intrusion des finalen Entwurfs in mm	Prozentuale Reduktion
rnd	0	153.7	118.5	-22.9 %
	5	185.3	130.1	-29.8 %
	10	187.3	131.1	-30.0 %
	15	-	198.2	-
	20	-	-	-
hex	0	171.4	118.1	-31.1 %
	5	175.1	119.4	-31.8 %
	10	195.8	129.6	-33.8 %
	15	-	217.8	-
	20	-	-	-
oct	0	171.1	119.1	-30.4 %
	5	190.3	120.6	-36.6 %
	10	188.7	130.0	-31.1 %
	15	-	206.8	-
	20	-	-	-
L	0	153.0	105.1	-31.3 %
	5	170.9	104.7	-38.7 %
	10	347.1	129.5	-62.7 %
	15	395.0	395.0	0.0 %
	20	-	-	-
T1	0	145.4	99.5	-31.6 %
	5	158.7	104.4	-34.3 %
	10	197.8	117.6	-40.6 %
	15	-	-	-
	20	-	-	-
T2	0	145.8	100.0	-31.4 %
	5	195.2	104.6	-46.4 %
	10	-	125.4	-
	15	-	-	-
	20	-	-	-
I	0	234.8	106.2	-54.8 %
	5	206.1	111.6	-45.8 %
	10	-	221.2	-
	15	-	-	-
	20	-	-	-

Profilstrukturen ohne angegebenen Intrusionswert weisen globale Biegung auf.

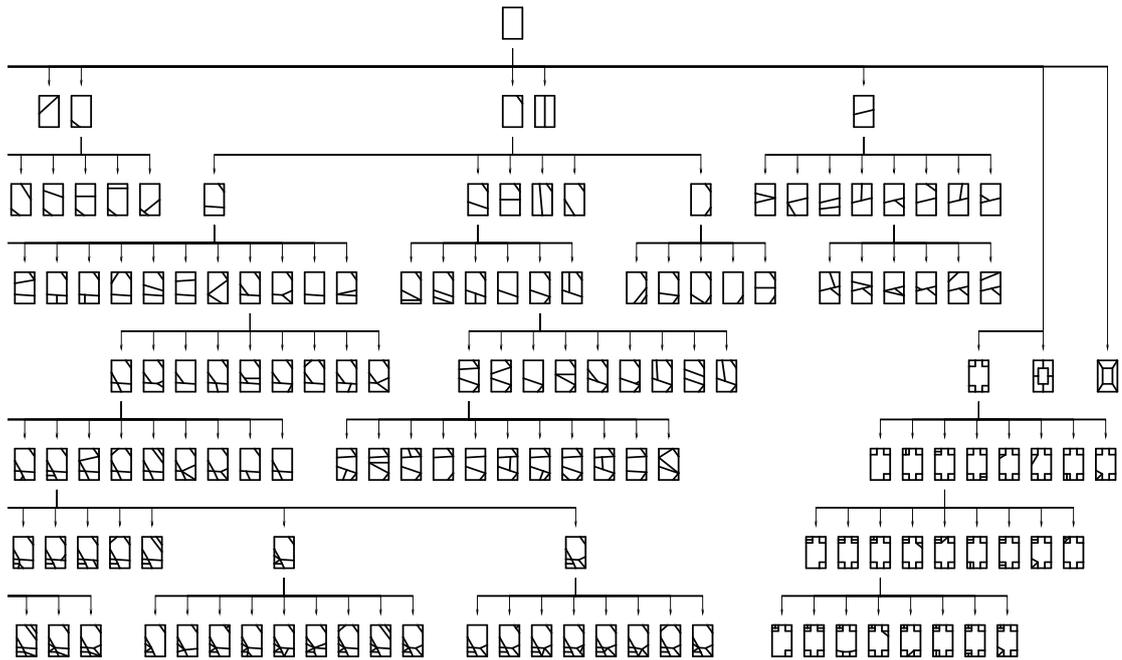


(a) Anwendungsbeispiel 2a: Minimierung der maximalen Kontaktkraft - linke Seite des Entwurfbaums der äußeren Optimierungsschleife

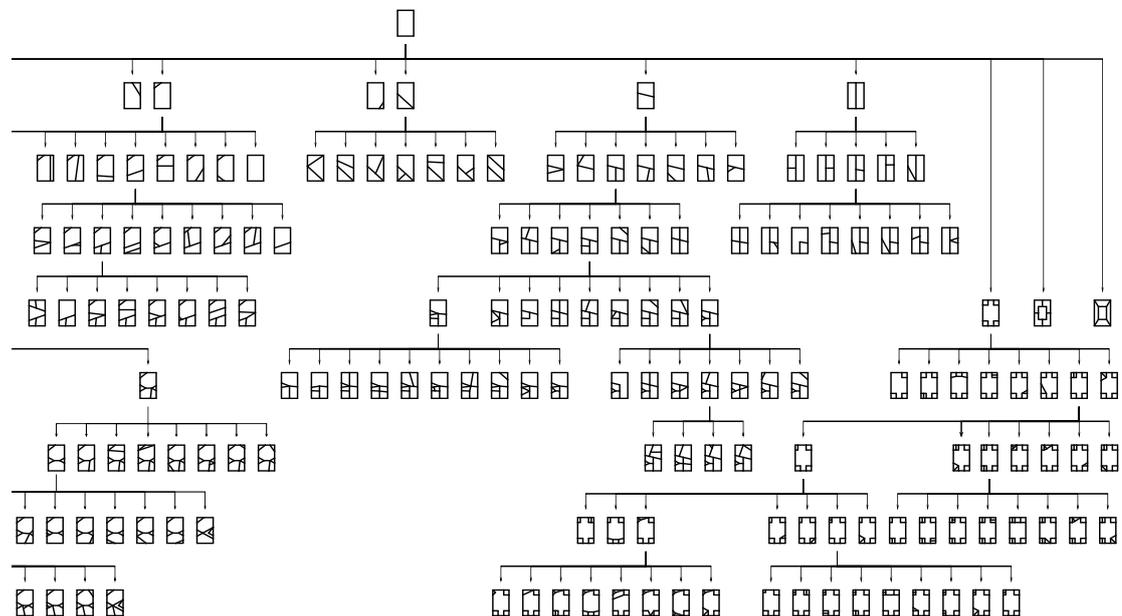


(b) Anwendungsbeispiel 2b: Minimierung der Masse - linke Seite des Entwurfbaums der äußeren Optimierungsschleife

Abbildung C-1: Anwendungsbeispiel 2: Entwurfsbäume der Topologieoptimierungen (Teil 1/2)



(a) Anwendungsbeispiel 2a: Minimierung der maximalen Kontaktkraft - rechte Seite des Entwurfsbaums der äußeren Optimierungsschleife



(b) Anwendungsbeispiel 2b: Minimierung der Masse - rechte Seite des Entwurfsbaums der äußeren Optimierungsschleife

Abbildung C-2: Anwendungsbeispiel 2: Entwurfsbäume der Topologieoptimierungen
(Teil 2/2)