

Entwicklung eines Optimierungsverfahrens für crashbelastete 3D-Rahmenstrukturen mit der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung

Dissertation
zur Erlangung eines Doktorgrades

in der
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
der
Bergischen Universität Wuppertal



vorgelegt von
Florian Beyer
aus Riesa

Wuppertal 2023

Tag der mündlichen Prüfung: 04.03.2024

Florian Beyer

Entwicklung eines Optimierungsverfahrens für crashbelastete 3D-Rahmenstrukturen mit der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung

Dissertation, Bergische Universität Wuppertal,

Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik,

Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen, Juli 2023

Kurzfassung

In der Entwicklung von crashbelasteten Strukturen in Personenkraftwagen ist der Insassenschutz von wichtiger Bedeutung. Getrieben durch die gesetzlichen Anforderungen bei dem Inverkehrbringen der Fahrzeuge und neuen Herausforderungen für neue Fahrzeugkonzepte werden innovative Methoden zur stetigen Verbesserung von Fahrzeugstrukturen benötigt. Teile der Fahrzeugkarosserie werden zur gezielten Energieabsorption durch Deformation bei Unfällen ausgelegt, um die Insassen zu schützen. Durch die steigende Komplexität zwischen Fertigungsverfahren, Lastfällen, Kosten und gesetzlichen Anforderungen, können automatisierte Optimierungsverfahren einen großen Beitrag zu dieser Entwicklung leisten.

Verfahren wie die Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung (GHT) zur Auslegung von Strangpressprofilen können erfolgreich Lösungen unter der Berücksichtigung von hochgradig dynamischen Lastfällen generieren, wie sie in der Automobilindustrie gefordert sind. Die Schwierigkeiten liegen in der Berücksichtigung von komplexen Materialverhalten mit großen Deformationswegen, Plastizität und Dehnratenabhängigkeiten. Außerdem müssen zwischen verschiedenen Komponenten Kontakte, Reibung und Wechselwirkung berücksichtigt werden können.

In dieser Dissertation wird eine Möglichkeit zur Optimierung von dreidimensionalen Rahmenstrukturen mit der GHT vorgestellt. Die Betrachtung beinhaltet die Berücksichtigung einer alternativen Geometrierepräsentation aus zusammengesetzten Profilen und deren Verbindungsknotenstrukturen und soll neue Möglichkeiten und Anwendungsfelder eröffnen. Darunter fällt die Berücksichtigung von geometrischen Restriktionen inklusive der Prüfung geometrischer Durchdringung im dreidimensionalen Raum. Für die nutzbare Topologieoptimierung werden aus Expertenwissen abgeleitete heuristische Regeln zur Optimierung von Lage und Anordnung der Profile neu konzipiert. Eine Besonderheit des Verfahrens stellt ein selektiver Prozess dar, in dem iterativ nur die besten Entwürfe verfolgt und weiter manipuliert werden. Innerhalb dieser Methode finden Form- und Dimensionierungsoptimierungen statt, aber auch das Skalieren von Querschnitten ist möglich. Die Leistungsfähigkeit wird in einer Reihe von praktischen Anwendungsbeispiele demonstriert. Dabei werden akademische Modelle untersucht und die Ergebnisse auf Plausibilität geprüft. Abschließend wird eine Möglichkeit zur Layout-Findung im Bereich eines Vorderwagens für neue Fahrzeugkonzepte gezeigt.

Stichworte: Crashbelastung, Rahmenstrukturen, Heuristiken, Topologieoptimierung

Florian Beyer

Development of an optimisation procedure for crashworthiness 3D frame structures by using the Graph and Heuristik based Topology Optimisation

PhD thesis, University of Wuppertal,
School of Mechanical Engineering and Safety Engineering,
Chair for Optimization of Mechanical Structures, July 2023

Abstract

Occupant safety is of major importance in the development of crash-loaded vehicle structures. In order to meet legal requirements and to keep up with new challenges in the automotive industry, such as new concepts and structures, innovative methods are necessary. Certain parts of a vehicle are made of a metal specifically designed to absorb energy during a crash for the purpose of protecting the passengers inside the vehicle. Automated optimization methods can be the answer to the increasing complexity of manufacturing process, load cases, costs, and legal requirements.

Methods such as Graph and Heuristic based Topology Optimisation (GHT) can successfully generate solutions for extruded profiles, taking into account highly dynamic load cases, as required in the automotive industry. When designing crash-loaded structures, it can be challenging to account for different variables such as plasticity, large amounts of deformation, or changes in strain rate. In addition, it is important to consider contact definitions, friction, and the interaction between different components in simulations.

The following dissertation presents a way to optimise three-dimensional frame structures with GHT methods. This research considers an alternative geometric representation from profiles, which are joined together with the aim to discover new opportunities and applications. Furthermore, specific techniques and approaches, which can be used to improve the design of frame structures for crashworthiness, are shown. This includes the description of different geometric constraints and detecting geometric penetration in three-dimensional space. For practicable topology optimisation, heuristic rules derived from expert knowledge are redesigned in order to fulfil the new requirements. One of the distinctive aspects of this approach is its selective process, in which only the most promising designs are chosen for further iterations of manipulation and refinement. During the optimisation process, it is possible to optimise both shape and size, as well as scale cross-sections. The performance of this approach is demonstrated in a series of practical application examples. This includes examining academic finite element models and checking the results in a mechanical way for their plausibility. Finally, the possibility of finding new concepts or layouts of the front of a vehicle is presented.

Keywords: Crashworthiness, frame structures, heuristics, topology optimisation

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	iv
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Ziele	2
1.2 Aufbau der Arbeit	3
1.3 Vorgegangene Publikationen im Rahmen der Promotion	4
2 Anwendungsfeld crashbelastete Strukturen	5
2.1 Insassenschutz	5
2.2 Seitlicher Pfahlaufprall	6
2.3 Unfälle mit geringfügigem Schaden	7
2.4 Einsatzgebiet Rahmenstrukturen	9
2.5 Schwierigkeiten bei der Auslegung crashbelasteter Strukturen	10
3 Einführung in die Grundlagen der Strukturoptimierung	13
3.1 Algorithmierte Strukturoptimierung	13
3.2 Arten der Strukturoptimierung	15
3.3 Ground Structure Approach	16
3.4 Topologieoptimierung: Dichtemethode	19
4 Optimierungsverfahren für crashbelastete Strukturen	23
4.1 Problemstellungen und Ziele	23
4.2 Form- und Wandstärkenoptimierung	24
4.3 Topologieoptimierung	25
4.3.1 Methoden der Hybrid Cellular Automata	25
4.3.2 Äquivalente statische Ersatzlasten	26
4.3.3 Ground Structure Approach - große Verformungen	28
4.3.4 Einsatz von geometrischen oder materiellen Sensitivitäten	28
4.3.5 Bidirectional Evolutionary Structural Optimization	29
4.4 Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung	30
4.4.1 Zweidimensionale Graphenbeschreibung	31
4.4.2 Heuristiken für laterale Belastung von Profilstrukturen	32
4.4.3 Optimierungsablauf und Anwendungsbeispiel	35

4.4.4	Weiterführende Arbeiten	37
5	Flexible Graphenbeschreibung für 3D-Rahmenstrukturen	39
5.1	Graphentheorie	39
5.2	Dreidimensionale translatorische und rotatorische Transformation	41
5.3	Beschreibung der 3D-Graphen-Syntax	42
5.3.1	Hierachische Graphenstruktur	42
5.3.2	Graphen-Element	43
5.3.3	Vertex-Element	44
5.3.4	Edge-Element	44
5.4	Die Richtung und Orientierung von Profilen	46
5.5	Extrusion entlang von Bahnkurven	47
5.6	Generierung von Strukturknoten	49
5.6.1	Abstandsbestimmung zwischen Geometrie und Verbindungspunkt	50
5.6.2	Starre Verbindungsknoten	51
5.7	Generierung nachgiebiger Verbindungsknoten	52
5.8	Erzeugung eines rechenfähigen Modells	61
5.9	Durchdringungsprüfung von Geometrie im Optimierungsprozess	63
6	Erweiterte Graphenfunktionen	68
6.1	Geometrische Restriktionen	68
6.2	Symmetrie des Graphen	69
6.3	Dimensionierungsvariablen	70
6.4	Formvariablen	70
6.5	Skalierung des Querschnitts	73
7	Heuristiken zur Optimierung crashbelasteter Rahmenstrukturen	74
7.1	Abstützen schnell deformierender Edges	75
7.2	Nutzen von Deformationsräumen Zug und Druck	78
7.3	Teilen langer Edges	80
7.4	Ausgleichen der Energiedichte und Löschen unbelasteter Edges	80
7.5	Skalieren der Wandstärken und Glätten des Graphen	82
7.6	Auswertung von Simulationsdaten	83
7.7	Strategien zur besseren Verbindungsmöglichkeit	84
7.8	Unterscheidung zwischen stark dynamischen und statischen Lastfällen	85
8	Ablauf der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung	86
8.1	Funktionsweise des Optimierungsablaufs	86
8.2	Ähnlichkeit von Entwurfsvorschlägen durch aktive Heuristiken	88

8.3	Innere Optimierungsschleife	89
8.3.1	Grundlegende Strategien für verschiedene Ziele	89
8.3.2	Aktivierung von Restriktionen	91
8.3.3	Anzahl von Rechnungen und Iterationen	91
8.4	Interpolation und Approximation mit Radial Basis Funktionen	92
8.5	Optimierungsverfahren Sequential Response Surface Method	95
8.6	Software Schnittstellen im Prozess	98
9	Praktische Anwendung und Demonstration der methodischen Prinzipien	100
9.1	Minimiere die Verschiebung – unter Biegung belasteter Rahmen	101
9.1.1	Parameteränderung der Massenrestriktion	107
9.1.2	Prozessunsicherheit	107
9.2	Starrer Pfahl trifft Rahmenstruktur mittig	108
9.2.1	Minimiere die maximale Kontaktkraft	109
9.2.2	Variation Masse Pfahl – Minimiere die Kontaktkraft	112
9.2.3	Minimiere die Strukturmasse	115
9.2.4	Prozessunsicherheit des Zielfunktionswerts	118
9.3	Minimiere die Kontaktkraft bei einer Inlay-Struktur	119
9.3.1	Änderung der Intrusionsrestriktion und Bauraumlänge	124
9.3.2	Diskussion	126
9.4	Layout Findung im Bereich eines Vorderwagens	127
9.4.1	Minimiere die Kontaktkraft	133
9.4.2	Diskussion	138
10	Kritik, Diskussionspunkte und Ausblick	140
10.1	Finden von Optima in der heuristikbasierten Optimierung und komplexe Zusammenhänge von Variablen	140
10.2	Aufbau der mechanischen Struktur	141
10.3	Robustheit der mechanischen Modelle	142
10.4	Die verwendeten Heuristiken	143
10.5	Ausblick	144
11	Zusammenfassung	146
	Literaturverzeichnis	149
	Anhang	157
A	Materialkarte Aluminium	157
B	Optimierungshistorie: Variation der Masse des Pfahls, Beispiel 2	158
C	Deformationsbilder: Variation der Masse des Pfahls, Beispiel 2	159
D	Auflösungsänderung: komplexe Durchdingungsprüfung	160

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BESO	Bidirectional Evolutionary Structural Optimization
CA	Cellular Automaton
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CFE	Crush Force Efficiency
CPU	Central Processing Unit
DoE	Design of Experiments
EA	Evolutionäre Algorithmen
ESLM	Equivalent Static Loads Method
ESO	Evolutionary Structural Optimization
FE	Finite Elemente
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
GHT	Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung
GHT3D	Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung für 3D-Rahmenstrukturen
GSA	Ground Structure Approach
HCA	Hybrid Cellular Automaton
HCATWS	Hybrid Cellular Automaton for Thin-Walled Structures
HIC	Head Injury Criterion
HPC	High-Performance-Computing
ID	Identifikationsnummer
LP	Linear Programming
NLP	Nonlinear Programming
NURBS	Non-uniform rational B-Spline
OLC	Occupant Load Criterion
PKW	Personenkraftwagen

RBF	Radiale Basis Funktion
RCAR	Research Council for Automobile Repairs
RSM	Response Surface Methodology
SEA	Spezifische Energieabsorption
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
SKO	Soft Kill Option
SLM	Selective Laser Melting
SQP	Sequential Quadratic Programming
SRSM	Sequential Response Surface Method
STL	Stereolithographie

Operatoren

Symbol	Bedeutung
x	Skalar
$x^{(k)}$	Skalar von Zeitpunkt, Element oder Punkt k
\vec{x}	Vektor (Spaltenvektor), \vec{x}^T ist der zugehörige Zeilenvektor
\vec{x}_i	i -ter Vektor aus einer Menge I
$ \vec{x} $	Betrag des Vektors \vec{x} , $ \vec{x} = \sqrt{\vec{x}^T \vec{x}}$
$\ x - y\ $	Euklidische Distanz zwischen x und y
\tilde{f}_x	Annäherung, Metamodell
\mathbf{X}	Matrix
\mathbf{X}^{-1}	Inverse der Matrix
\mathbf{X}^T	Transponierte der Matrix
Δ	Differenz

Mengenlehre

\setminus	$A \setminus B$: Differenz der Mengen A und B
\cap	$A \cap B$: Schnittmenge von A und B
\wedge	$A \wedge B$: Konjunktion von A und B
\vee	$A \vee B$: Disjunktion A oder B
\in	$i \in A$: das Element i ist in der Menge A enthalten
\notin	$i \notin A$: das Element i ist nicht in der Menge A enthalten
\forall	$\forall i \in A$: für alle Elemente i in der Menge A

Lateinische Zeichen

a	Beschleunigung
c_i^k	Gitterpunkt i des Objekts k
d	Distanz
d_{dyn}	Dynamischer Wandstärkenfaktor
E	E-Modul
E_a	Energieabsorption
ED	Energiedichte
E_e	E-Modul des Elements e
F	Kraft, Kontaktkraft
F_m	gemittelte Kraft, ideales Kraftniveau
F_{max}	Kraftpeak, maximale Kraft
i	Laufvariable
j	Laufvariable
k	Laufvariable
l	Länge
L	Schnittlinie
m	Masse, Gewicht
M_i	Quader i
N	Anzahl von Knoten, Elementen oder Entwürfen
N_{fe}	Anzahl der Finite-Elemente
N_h	Anzahl der heuristischen Regeln
N_{ke}	Anzahl an konkurrierenden Entwürfen
$N_{i,p}(u)$	Spline Basisfunktion vom Grad p , abh. vom Knotenvektor u
p	Penaltyexponent, Punkt
\vec{p}_i	Punkt i im kartesischen Raum
r	Radius
$R_{i,p}(u)$	Rationale Basisfunktion
$\mathbf{R}_{1,2,3}$	Rotationsmatrix um Richtung 1, 2, 3
s	Weg, Strecke, Verschiebung
t	Zeit bzw. Zeitpunkt oder Wandstärke
\vec{t}	Werte für translatorische Verschiebung
t_0	Startzeit der Simulation
t_{end}	Endzeit der Simulation

T_i	Dreieck i , Menge der Zeitpunkte
V_i^k	Eckpunkt i des Dreiecks k , Volumen Element i
v	Geschwindigkeit
w	Wichtungen
x	X-Koordinate, Kartesischer Raum
y	Y-Koordinate, Kartesischer Raum
z	Z-Koordinate, Kartesischer Raum

Griechische Zeichen

α_i	Deformationsindex für <i>Edge</i> i
γ	Formfaktor für Radiale Basisfunktion
δ	maximale Deformationslänge
σ	Spannung
σ_{min}	minimale Spannung
σ_{max}	maximale Spannung
$\sigma_{truss,i}$	Spannung im Stab i
σ	Spannung
ρ	Dichte
Θ	Drehwinkel, geändertes System
η	Beul-Index
ϑ_i	Vertex i
ϵ_i	Edge i
ψ	Rotationswinkel 1 für Koordinatentransformation
ε	Rotationswinkel 2 für Koordinatentransformation
ϕ	Rotationswinkel 3 für Koordinatentransformation
φ	Winkel, Verbindungswinkel
ξ	Achse 1, gedrehtes System
ζ	Achse 2, gedrehtes System
$\Phi_{(r)}$	Radiale Basisfunktion

Trennzeichen

Einzelne Werte in Auflistungen werden mit Kommata getrennt.
Als Dezimaltrennzeichen dient daher der Punkt.

1 Einleitung

Bei technischen Problemstellungen treten schnell komplexe Zusammenhänge zwischen einzelnen Parametern auf, die eine gezielte Verbesserung von Produkten im Entwicklungsprozess erschweren. Bei neuen Produkten jedoch führen automatisierte Optimierungsverfahren relativ schnell zu recht guten Ergebnissen, bei denen außerdem wichtige Zusammenhänge und Einflussgrößen offengelegt werden können. Prinzipiell können Optimierungsverfahren als Methoden in Konzeptphasen direkt im Entwicklungsprozess oder an fast fertigen Produkten wichtige Unterstützung leisten. Erreicht werden kann beispielsweise eine Reduzierung der Entwicklungszeit, wobei eine Vielzahl von produktspezifischen Anforderungen in einem automatisierten Prozess berücksichtigt werden müssen. Allerdings kann der Fall eintreten, dass aufgrund des Umfangs an möglichen Entwurfsvariablen die Ermittlung einer Verbesserung in allen Belangen scheitert. Dies gilt insbesondere für Produkte, die schon über längere Zeiträume immer wieder Optimierungsprozessen unterlagen.

Die Auslegung von crashbelasteten Strukturen in der Fahrzeugentwicklung, bei denen die Betrachtung von Plastizität oder kontrollierter Deformation ein wichtiger Bestandteil sind, zeigen beispielhaft komplexe Herausforderungen für Optimierungsverfahren. Die kontrollierte Deformation zur Aufnahme kinetischer Energie, die in ein System eingeleitet wird, stellt einen wichtigen Faktor bei der Auslegung dar. Ein weiteres Ziel von tragenden oder mechanisch relevanten Strukturen, bildet die Gewichtsreduzierung eine weitere Herausforderung, um infolge dessen den Kraftstoff- oder Stromverbrauch zu reduzieren. Besonders bei gegensätzlicher Einflussgrößen bedarf es eines geschickten Umgangs von Strategien, Kriterien und Restriktionen bei der Bewertung. Bevor eine iterative und automatisierte Methode zur Lösungsfindung angewendet werden kann, muss in erster Linie die Problemstellung ausformuliert werden. Die Erkenntnis, welche wichtigen Einflussgrößen und Ziele einbezogen werden, stellt dabei den ersten Schritt dar. Unter Berücksichtigung erster Ergebnisse kann ein Teil des Prozesses die erneute Betrachtung und Evaluation der Eingabewerte sein, um die Problemformulierung zu präzisieren. In vielen Fällen ist es oft nicht möglich, eine exakt richtige Lösung zu generieren, weil diese schlichtweg nicht existiert. Zumeist besteht die Lösung in der Findung von Kompromissen, wobei einzelne Anforderungen mal mehr oder weniger gut bedient werden können. In der Literatur und in der praktischen Anwendung existiert eine umfangreiche Anzahl verschiedenster Optimierungsalgorithmen für unterschiedliche Problemstellungen. Viele mathematische Verfahren helfen erfolgreich bei der Generierung von Lösungen. Aber auch heuristische Verfahren, also Verfahren, die auf Regeln basieren, tragen einen Teil dazu bei.

Besonders im Bereich von Problemstellungen mit nicht-linearen Zusammenhängen, zeigt sich ein erhöhter Anteil an heuristischen Strategien. Das liegt daran, dass häufig hochgradig nicht-lineare Funktionsverläufe nur schwer oder gar nicht durch mathematische Verfahren effizient abgebildet oder analysiert werden können. Eine Möglichkeit zur Behandlung solcher Problemstellungen bieten regelbasierte Verfahren mit stark reduzierten Abläufen. In diesem Zusammenhang wird im Folgenden die Minimierung eines Wertes unter Einhaltung definierter Restriktionen verstanden.

Ein Graph setzt Punkte oder Informationen in Beziehung und stellt diese in abstrahierter Form dar. Der graphenbasierte Optimierungsablauf besteht im Wesentlichen aus einer Graphensyntax als Bindeglied zwischen den veränderbaren Geometrien, den dazugehörigen Simulationsmodellen und einer Ablaufsteuerung. Der Modellaufbau ist streng definiert, sodass Simulationsmodelle idealerweise ohne systemische Fehler aus der Syntax abgeleitet werden können. Außerdem werden Methoden herangezogen, die auf Basis der Syntax eine Manipulation der Geometrie nach Vorgabe erlauben.

1.1 Problemstellung und Ziele

Die heute vielfach eingesetzten Verfahren zur Topologieoptimierung sind für Bauteile mit linear elastischen Strukturverhalten konzipiert. In diesem Fall sind die Verfahren wegen der Bereitstellung der (semi-)analytischen Sensitivitäten der Ziel- und Restriktionsfunktionen nach den Entwurfsvariablen effizient einsetzbar (Schumacher, 2020). Es können also allenfalls moderat nicht-lineare Eigenschaften des Bauteils in der automatisierten Optimierung berücksichtigt werden. Die Anforderungen für linear statisch belastete Strukturen stellen in erster Linie eine geringe Nachgiebigkeit dar. Crashrelevante Ziel- und Restriktionsfunktionen können hierbei nicht berücksichtigt werden. Bei der Auslegung crashbelasteter Strukturen, kann eine optimale Energieabsorption für ein vorgegebenes Kraftniveau aber relevant sein. Deshalb müssen für die Topologieoptimierung spezielle Verfahren entwickelt werden.

Die Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung (GHT – Ortmann, 2015) als Methode kann erfolgreich crashbelastete Querschnitte von Extrusionsprofilen optimieren. Durch Algorithmen zur Manipulation des Graphen können im Ergebnis Profile optimal für Energieaufnahmefragestellungen ermittelt werden. Das Finite-Elemente Modell des Profils entsteht dann aus einem zweidimensionalen Graphen durch Extrusion in Richtung der dritten Dimension. Die Layout-Findung von dreidimensionalen Rahmenstrukturen ist mit der bisherigen Methode nicht möglich.

Diese Entwicklungsarbeit soll zeigen, wie die Optimierung mittels flexibler dreidimensionaler Graphensyntax und unter Berücksichtigung von crashrelevanten Ziel- und Restriktionsfunktionen methodisch möglich sind. Durch die Verwendung von dreidimensionalen Graphen kann die Komplexität im Vergleich zur Betrachtung von zweidimensionalen Graphen deutlich ansteigen. Eine Besonderheit stellt die automatisierte topologische Modifikation dar, die durch einer Reihe von heuristischen Regeln erfolgt. Für die Umsetzung werden die aus Expertenwissen abgeleiteten Heuristiken für die neue Geometriepäsentation neu konzipiert.

Außerdem werden Methoden für Anforderungen, wie Durchdringungsprüfungen, Form- und Wandstärkenoptimierungen neu aufgesetzt. Das Verfahren soll zur Layout-Findung von dreidimensionalen Rahmenstrukturen in Teilen von Personenkraftwagen eingesetzt werden. Die vorliegende Arbeit und das Verfahren sollen die Problemstellen aufzeigen, neue Möglichkeiten und neue Anwendungsfelder eröffnen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Zu Beginn wird das Anwendungsfeld und damit einhergehende Schwierigkeiten, sowie wesentliche Grundlagen erläutert, die für das Verständnis wichtig sind (Kapitel 2, 3 und 4). Zur Optimierung von dreidimensionalen Strukturen wird eine Syntax für dreidimensionale Graphen eingeführt. Zur vollständigen geometrischen Beschreibung der zu optimierenden Strukturen wird ein zweidimensionaler Graph zur Querschnittsbeschreibung verwendet und den dreidimensionalen Kanten zugeordnet. Die Modellierung erfolgt über einen eigens dazu entwickelten Triangulator, mit standardisierten Geometrieformat. Die Eröffnung der dritten Dimension im Graphen bietet neue Möglichkeiten, wie die Orientierung von Strukturteilen oder die Dimensionierung von Querschnitten (siehe Kapitel 5). Die Geometrie besteht im Ergebnis aus mehreren zusammengesetzten Profilen. Mit der flexiblen Syntax werden dann Rahmenstrukturen abgebildet und für definierte Crashlastfälle optimiert. Für die Verbindungsknoten werden generische Hohlstrukturen verwendet, die aus der gegebenen Profilanordnung automatisiert erzeugt werden (siehe Kapitel 5.7). Neben der Geometriemanipulation können geometrische Restriktionen bzw. Herstellungsrestriktionen auf der Graphenebene innerhalb des Optimierungsablaufs berücksichtigt werden. Dazu entstehen neue komplexere Fragen in Bezug auf Symmetriebedingungen oder Durchdringungsprüfungen, die es zu beleuchten gilt (siehe Kapitel 5.9 und 6). Des Weiteren sind die Änderungen der Geometrie auf Basis von erzeugten Simulationsdaten durch verschiedene Heuristiken ein Schwerpunkt. Für die Anwendung im dreidimensionalen Raum wird das vorhandene Wissen aus den bestehenden Heuristiken übertragen (siehe Kapitel 7). Während des Ablaufs finden topologische Modifikationen, Form- oder Dimensionierungsoptimierungen statt. Nicht nur durch einzelne heuristische Regeln werden in diesem Prozess Verbesserungen erzielt, viel mehr trägt der selektive GHT-Prozess dazu bei, der für die dreidimensionale Syntax neu aufgesetzt wurde (siehe Kapitel 8). Idealerweise sollen mit dieser Prozedur automatisiert und iterativ Verbesserungen für verschiedene Problemstellungen erzielt werden können. Nicht nur unterschiedliche Lastfälle, sondern auch Ziele, wie Gewichts-, Kontaktkraft- und Intrusionsprobleme sollen behandelt werden. Der Ablauf wird in dieser Arbeit im Detail erläutert und mit wichtigen Gedankengängen beschrieben. Die Leistungsfähigkeit des Optimierungsprozesses wird an verständlichen Beispielen demonstriert (siehe Kapitel 9).

1.3 Vorangegangene Publikationen im Rahmen der Promotion

Zu dieser Dissertation existieren die folgenden Veröffentlichungen, deren Teile in Bild und Schrift sich in dieser Dissertation abschnittsweise wiederfinden:

- Beyer F., Schumacher, A. (2023): "*Optimizing Inlay Structures for a thin walled crash loaded tube element by using the Graph and Heuristic based Topology Optimization*", Structural and Multidisciplinary Optimization, Oral presentation on the 15th World Congress of Structural and Topology Optimization (WCSMO 15), 5th-9th June, 2023, Cork, Irland
- Beyer F., Schumacher A., Pohl T. (2022): „*Neue Möglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung von 3D-Crash-Strukturen durch detaillierte Modellierung der Verbindungsknoten*“, erschienen in den VDI-Berichten zum 20. VDI-Kongress SIMVEC – Aktuelle Herausforderungen bei der Auslegung und Absicherung von Fahrzeugsystemen, 22.-23.11.2022 in Baden Baden, ISBN: 978-3-18-092407-6
- Beyer F., Schneider D. und Schumacher A. (2021): "*Finding three-dimensional layouts for crashworthiness load cases using the graph and heuristic based topology optimization*". *Struct. Multidisc. Optim.* (2021) 63:59.73, DOI:10.1007/s00158-020-02768-0
- Schumacher A, Beyer F. (2020): „*Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen*“, FAT-Schriftenreihe 329, ISSN 2192-7863
- Beyer F., Schneider, D., Schumacher, A. (2019): "*Development of heuristics dealing with material failure of composite profile structures for the Graph and Heuristic based Topology Optimization*", Xu Guo and Hai Huang, Editors in chief, Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization, Proceedings of the 13th World Congress of Structural and Topology Optimization (WCSMO 13), May 20-24, 2019, Beijing, China, ISBN: 978-7-89437-208-6

Teile der Bachelorarbeit von Miriam Kick im Bereich der Graphensyntax mit dem Titel „*Entwicklung einer Software zur Beschreibung von dreidimensionalen Strukturen in der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung*“ haben dazu beigetragen. Die Ergebnisse und Methoden sind Teil des Projekts der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., mit dem Titel „*Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen*“ (FAT Schriftenreihe 329) und des AiF-Projekts (Allianz Industrie Forschung), „Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)“ IGF-Vorhaben Nr.: 21621 N/1, mit dem Titel „*Graphen- und heuristikbasierte Topologieoptimierung von 3D-Crash-Strukturen von Personenkraftwagen*“, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Für die Identifikation von Anforderungen und Praxisbezug wurde ein projektbegleitender Ausschuss einbezogen, mit Vertretern von Volkswagen AG, Ford-Werke GmbH, Opel Automobile GmbH, Benteler AG und verschiedener Softwarefirmen.

2 Anwendungsfeld crashbelastete Strukturen

2.1 Insassenschutz

Der Insassenschutz stellt einen wichtigen Bestandteil in der Fahrzeugentwicklung dar, welcher durch gesetzliche Anforderungen getrieben wird. Die Fahrzeugstrukturen sollen durch Anforderungen mit standardisierten Szenarien und Normungen die Insassen im Unfall über aktive und passive Sicherheit schützen. Die aktive Sicherheit bezeichnet alle Funktionen und Elemente zur Vermeidung eines Unfalls, wohingegen die passive Sicherheit sich der Reduktion der Verletzungsgefahr bei einem eintretenden Unfall widmet. Zur passiven Sicherheit gehören beispielsweise *Airbags*, Sicherheitsgurte, sowie Kopfstützen oder Kindersitze. Auch die aktive Motorhaube im Fußgängerschutz zählt durch das Aufstellen der Motorhaube und einer Verlängerung des Deformationswegs zur passiven Sicherheit. Vorgaben und Lastfälle zur Auslegung der Fahrzeugstrukturen werden auf Basis von Unfallstatistiken gebildet und decken nicht alle erdenklichen Unfallsituationen ab. Die Gestalt der Karosseriestruktur kann durch die sogenannte "Knautschzone" (Deformationszone) dazu gezählt werden. Die Karosserie lässt sich in drei Bereiche mit verschiedenen Anforderungen aufteilen. Im vorderen und hinteren Bereich befinden sich diese Deformationszonen, die mit verschiedenen Energieaufnahme-potentialen für verschiedene Lastfälle ausgelegt sind. Der mittlere Teil stellt die Insassenzelle dar, die möglichst als Überlebensraum im Unfall dienen soll. Auch an den seitlichen Bereichen der Insassenzelle befinden sich beispielsweise Schweller, die an einer Energieabsorption beteiligt werden. Das Kraftniveau der Deformationszone steigt stufenweise der Länge nach von der vorderen Front für Fußgängerschutz, Bagatell-Unfälle und Unfälle mit geringfügigem Schaden stetig an. Die Crash-Dosen im Bereich des Stoßfängers sind für ein Kraftniveau mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 15 km/h ausgelegt. So folgen hinter dem Stoßfänger Strukturen mit höherem Energieaufnahme-potential für Unfälle mit erhöhten Geschwindigkeiten. Die Deformationszonen sollen möglichst in ihrer Struktur im Deformationsprozess erhalten bleiben und nicht unkontrolliert kollabieren. Dazu abgestimmt müssen die Insassenverzögerungswerte im Unfall möglichst gering gehalten werden. Jegliche Aufprallenergie, die in den Deformationszonen aufgenommen werden kann, erhöht die Sicherheit der Insassen.

Zur Erfüllung dieser Anforderungen arbeitet eine Vielzahl von Technikern und Technikerinnen, sowie Ingenieure und Ingenieurinnen verschiedener Abteilungen an Konzepten, Systemen, Strukturgestaltung und Materialauswahl im Bereich von aktiver und passiver Sicherheit von Fahrzeugen. Die Thematik erfordert das Zusammenspiel von Sensorik, Unfallforschung,

Biomechanik, Simulationsmethodik und Versuchen (als Ergänzung dazu: Kramer, 2009). In der Fahrzeugentwicklung werden nicht nur die gesetzlichen Lastfälle abgedeckt, sondern zusätzlich gehören noch herstellereigene, interne erfahrungsbasierte Lastfälle zu den Anforderungen, denen es zu begegnen gilt.

Im Folgenden wird ein Simulationsmodell mit zwei unterschiedlichen Lastfällen beschrieben. Bei dem Modell handelt es sich um ein Honda Accord Modell von 2017¹, welches von der US-Behörde *National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)* zur Verfügung gestellt wird. Das Modell ist für den FE-Solver LS-DYNA zur numerischen Berechnung aufgebaut. Die Geometrie wird überwiegend durch Schalen-Elemente und mit wenigen Volumen-Elementen abgebildet. Die Volumen-Elemente werden beispielsweise für Scharniere oder Füge-Techniken, wie Klebe- und Schweißverbindungen verwendet. Im Entwicklungsprozess werden in der Regel für unterschiedliche Anforderungen auch unterschiedliche Modelle mit geänderten Detaillierungsschwerpunkten erzeugt. Der Detaillierungsgrad unterscheidet sich beispielsweise in der Anzahl von Komponenten, denn Teile mit geringem Einfluss können ggf. unberücksichtigt bleiben. Außerdem werden Modelle für statische Lasten mit anderen Solvern berechnet als Modelle mit Crashlastfällen. Hinzu kommen noch unterschiedliche Disziplinen, wie Akustik oder Strömungssimulationen.

2.2 Seitlicher Pfahlaufprall

In Abbildung 2.1 ist der Lastfall des seitlichen Pfahlaufpralls dargestellt. Das Fahrzeug wird mit einer Geschwindigkeit von 32 km/h seitlich unter einem Winkel von 75° gegen einen starren Pfahl geschleudert. Der Durchmesser des Pfahls beträgt 254 mm . Der Lastfall entspricht der Vorgabe nach Euro NCAP² 2022. Aufgrund der geringen Deformationszone zwischen Pfahl und Insassen stellt dieser Lastfall hohe Anforderungen an die Insassenzelle.

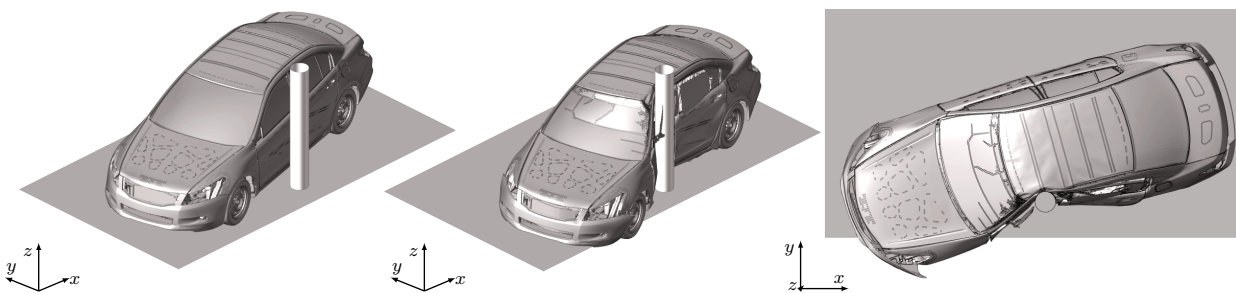


Abbildung 2.1: Seitlicher Pfahlaufprall, nach Euro NCAP 2022 – Fahrzeug wird seitlich gegen einen Pfahl geschleudert. Ausgangszustand, links; Deformierter Zustand, mitte (isometrische Ansicht) und rechts (Ansicht von oben) – simuliert mit LS-DYNA

¹Die simulierten Lastfälle sind nicht enthalten

²The European New Car Assessment Programme, Euro NCAP ist eine Gesellschaft europäischer Verkehrsministerien, Automobilclubs und Versicherungsverbände mit Sitz in Brüssel.

Zum Schutz der Insassen können als sicherheitsrelevante Maßnahmen in erster Linie Seitenairbags im Bereich Kopf und Thorax, aber auch Zentral- oder Mittenairbags zum Schutz vor Kollision zwischen den Insassen genannt werden. In diesem Zusammenhang müssen die Karosseriestrukturen ebenfalls genügend Steifigkeit aufweisen, damit der Pfahl nicht zu stark in die Insassenzelle eindringt. Besonders bei der Auslegung des Unterbodens von elektrisch betriebenen Kraftfahrzeugen im Bereich des *Battery Containment* erlangt der Lastfall neue Bedeutung. Die gesetzlichen Anforderungen können sich aufgrund von aktuellen Unfallstatistiken oder neuen Errungenschaften in der Technik in Bezug auf Assistenzsystemen jährlich ändern.

2.3 Unfälle mit geringfügigem Schaden

In Abbildung 2.2 ist eine andere Art von Lastfall aus dem Bereich *Low Speed Crash*, für die Typklasseneinstufung *RCAR³/AZT⁴* abgebildet. Dabei handelt es sich um einen Crashtest, bei dem das Fahrzeug mit 15 km/h gegen eine um 10° geneigte starre Barriere gefahren wird. Die Barriere hat eine Überdeckung von 40 % und soll kleinere Bagatellunfälle darstellen. Grundsätzlich sorgen Crashelemente im vorderen Bereich des Fahrzeugs für den Abbau der Energie. Diese Crash-Dosen sollen die Energie aufnehmen, ohne die dahinter liegenden Strukturen zu beschädigen. Damit wäre eine kostengünstigere Instandsetzung möglich. Dieser Lastfall wird als Versicherungseinstufungstest zur Bestimmung von Instandhaltungskosten eingesetzt und steht im Zielkonflikt zu der Auslegung von passanten- und insassenschutzgerechter Vorderwagenbereiche.

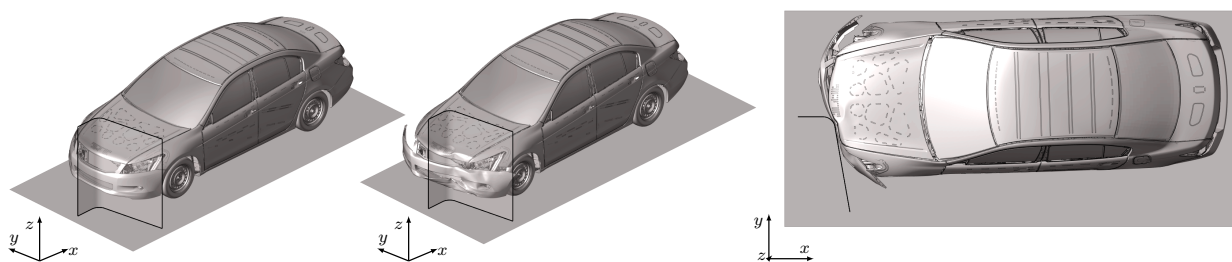


Abbildung 2.2: Low Speed Crash, RCAR/AZT zur Versicherungseinstufung, 40% Überdeckung bei 15 km/h – simuliert mit LS-DYNA

Die Crash-Dose im Honda Accord Modell besteht aus zwei zusammengesetzten Blechen aus Stahl, die mit Schweißpunkten gefügt sind. Zur Einbindung in die Baugruppe sind jeweils Adapterplatten, siehe Abbildung 2.3 (rechts), vorhanden. Die isolierte Betrachtung zeigt das Deformationsverhalten zusammen mit dem Kraft-Weg-Verlauf (Abb. 2.3 links). Die gemessene Kraft ist die Kontaktkraft zwischen Bauteil und der darauf drückenden Komponente, hier in diesem Fall eine starre Wand. Dieser Verlauf bildet das Kraftniveau im Deformationsverhalten über die Zeit ab und wird für die Auslegung betrachtet. Zur qualitativen

³Research Council for Automobile Repairs

⁴Allianz-Zentrum für Technik GmbH

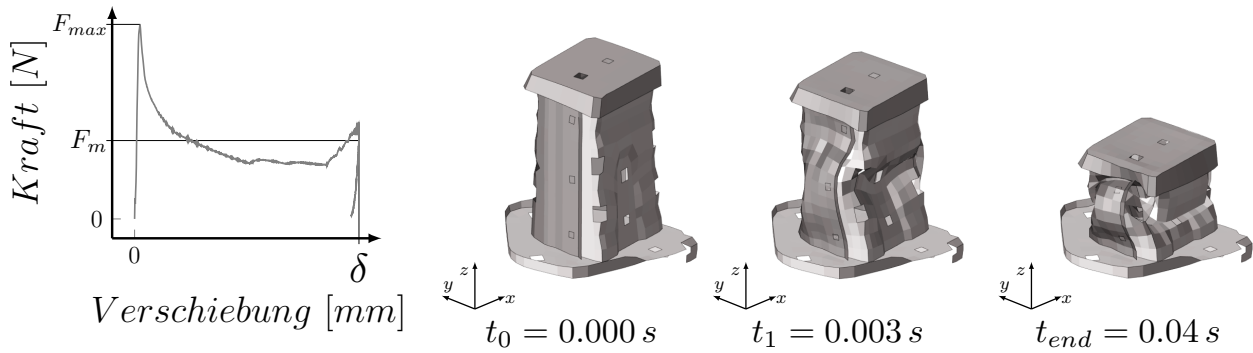


Abbildung 2.3: Kraft-Weg-Verlauf Crash-Dose (links) Crash-Dose Deformationsverlauf - aus Honda Accord 2017, LS-DYNA Modell (rechts)

Bewertung von Kraft-Weg-Verläufen können nach, Yu et al., 2015 oder C. Zhou et al., 2018 einige Indizes aus den Eckdaten der Kurve ermittelt werden.

Die Auswertung kann im Anschluss der Berechnung erfolgen und hilft bei der Einordnung bzw. Beurteilung. Als Ziel soll eine Aussage über die Deformationseffizienz entstehen. Dazu kann die Energieabsorption E_a direkt aus den Daten mittels numerischer Trapezregel als Annäherung bestimmt werden:

$$E_a = \int_0^{\delta} F_{(s)} ds \quad (2.1)$$

Dabei stellen $F_{(s)}$ die Kraftwerte in Abhängigkeit der Deformationslänge s dar und δ gibt die finale Deformationslänge an. Die spezifische Energieabsorption SEA bezieht sich auf die Strukturmasse der Crash-Dose m :

$$SEA = \frac{E_a}{m} \quad (2.2)$$

Außerdem kann eine gemittelte Kraft F_m durch die Energieabsorption zusammen mit δ definiert werden:

$$F_m = \frac{E_a}{\delta} \quad (2.3)$$

Mit dem maximalen Kraftpeak F_{max} , der zu Beginn des Deformationsprozesses auftreten kann, wird demnach die *Crush Force Efficiency CFE* ermittelt:

$$CFE = \frac{F_m}{F_{max}} \quad (2.4)$$

Dabei wird ersichtlich, dass der optimale CFE-Wert gegen 1 verläuft und ein nahezu rechteckiger Verlauf als optimal eingordnet wird. Die Kraft sollte direkt auf ein konstantes Kraftlevel ansteigen und am Ende genauso schnell wieder absinken. F_m stellt damit einen Vergleichswert für das angestrebte Kraftniveau aus der vorhandenen Datenlage dar. Dieses Kraftniveau beinhaltet die gesamte Energie, die in ein System eingebracht bzw. von der Struktur aufgenommen wird. Für die Auslegung von dünnwandigen Crash-Dosen bedarf es einer geschickten Platzierung von Verprägungen zur gezielten Initialisierung von Falten und Beulen, um ein optimales Kraft-Weg-Niveau zu erzielen. Mit Verprägungen oder Ausspa-

rungen können Stellen verstärkt bzw. geschwächt werden. Im Entwicklungsprozess kann in Abhängigkeit der Energieabsorption eine minimale Bauraumlänge ein Ziel darstellen.

2.4 Einsatzgebiet Rahmenstrukturen

Rahmenstrukturen im klassischen Sinn finden sich im Bauingenieurwesen und der Architektur wieder. Dazu werden Begriffe verwendet, wie Space Frame oder auch „Raumfachwerk“. Der Einsatz reicht von fachwerkartigen Strukturen im Bereich des Daches von Gebäuden, Hallen, Stadien bis hin zu Krananlagen und Kuppeln. Die Struktur besteht aus Streben oder auch Traversen, die über Strukturknoten geradlinig miteinander verbunden werden. Als Querschnitt können runde oder quadratische Rohre eingesetzt werden. Der Aufbau zeichnet sich in der Regel durch eine gleichmäßige Anordnung von immer wiederkehrenden Mustern aus, mit denen der Bauraum gefüllt wird. Die Rohre können aus beispielsweise Stahl, Aluminium oder auch CFK (Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff) hergestellt werden. Aus mechanischer Sicht stellt diese Art von Aufbau starre und leichte Gebilde dar, in denen die Belastungen in Zug- und Druckbelastungen innerhalb der Struktur abgetragen werden. In der Regel werden diese Fachwerksstrukturen mit Anforderungen im linear elastischen Deformationsbereich ausgelegt.

Auch in Karosserien Fahrzeugen können Rahmenstrukturen eingesetzt werden. Eines der bekanntesten Beispiele ist das Audi-Aluminium Space Frame Konzept (ASF). Die Trägerprofile werden als geschlossene Strangpressprofile ausgeführt und die Knotenverbindungen werden durch Aluminium Druckgussknoten erzeugt. Abbildung 2.4 zeigt die *Space Frame* Bauweise.

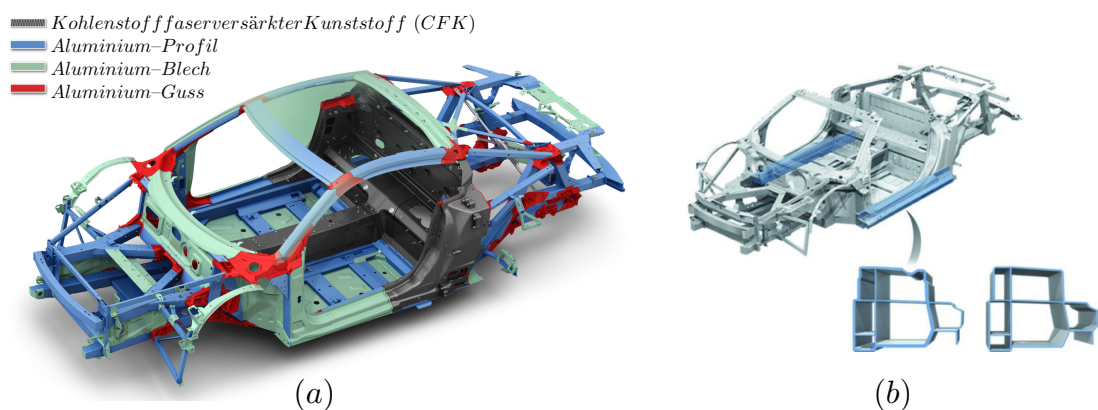


Abbildung 2.4: Audi Aluminium Space Frame Konzept in Multimaterialbauweise des Audi R8 Coupé V10, Bild: AUDI AG, 2019 (a), Strangpressprofil im Bereich des Unterbodens, Bild: Pischinger und Seiffert, 2021 (b)

Für fehlende Schubsteifigkeit, werden offene Flächen der Gitterrohrrahmen mit Aluminiumblechen geschlossen. Insgesamt werden Gussteile, Strangpressprofile und Bleche im Materialmix eingesetzt. Außerdem wird auf die ASF-Architekturen von Varianten in profilintensiver Bauweise mit geringeren Kosten bis hin zu gussintensiven Ausführungen mit höherem Fahrkomfort eingegangen.

2.5 Schwierigkeiten bei der Auslegung crashbelasteter Strukturen

In der Entwicklung und Auslegung des Crashverhaltens von Fahrzeugen mit beispielhaften Lastfällen, die im Kapitel zuvor genannt wurden, werden reale Versuche als Test von Gesamtfahrzeugen, Baugruppen und einzelnen Komponenten durchgeführt. Zwar konnte in den letzten Jahren die Anzahl an Versuchen stark durch die Integration von Finite-Elemente Simulationen im Entwicklungsprozess reduziert werden, doch die komplette Abdeckung durch Simulationsmethoden zur Prognose von crashbelasteten Strukturen bzw. zur Abdeckung von gesetzlich vorgegeben Lastfällen ist zurzeit noch nicht möglich. Die Erstellung und Berechnung von Simulationsmodellen ermöglicht eine Vorauslegung und dient der Überprüfung von Sachverhalten mechanischer Natur. So lassen sich verschiedene Entwürfe grundsätzlich simulativ vergleichen. Die Berechnung dieser Modelle stellt zwar einen beachtlichen Ressourcenaufwand dar, doch sind diese gegenüber Versuchskosten deutlich geringer. Neue Strukturvorschläge können relativ schnell erstellt und mittels Simulationen überprüft bzw. evaluiert werden. Grundsätzlich wird das gesamte Fahrzeug zur Auswertung simulativ abgebildet, denn die Wechselwirkungen von Komponenten bei Deformation und Kontakt besitzen einen relevanten Einfluss auf die technischen und physikalischen Größen, die zur Bewertung herangezogen werden. Im Folgenden sind einige crashrelevante Aspekte zur Auswertung aufgeführt:

- Spezielle Beschleunigungswerte, z.B. der OLC-Wert (Occupant Load Criterion) oder der HIC-Wert (Head Injury Criterion)
- Energieabsorption,
- Spezielle Kraftniveaus
- Glatte Kraft-Weg-Kurven
- Spezielle Lastpfade für bestimmte Lastfälle
- Hohe Steifigkeiten – z.B. bei Komponenten im Kraftfluss im Fahrgastbereich
- Geringe Steifigkeiten – z.B. an den möglichen Kopfaufprallpositionen
- Sicherheitskriterien – wie z.B. die Dichtigkeit des Kraftstoffsystems

Crashelemente bestehen zum überwiegenden Teil aus dünnwandigen Strukturen, die aus Aluminium oder Stahl gefertigt werden. Dazu zählen Strangpressprofile (Aluminium) oder Strukturen, die in der Schalenbauweise (Stahl) zusammengesetzt werden. Die gesamte Fahrzeugkarosserie kann durch die Schalenbauweise zusammengesetzt sein und erhält erst durch unterschiedliche Fügeverfahren ihre Struktursteifigkeit. Der Einsatz von dünnwandigen Strukturen kann Vorteile im Bezug auf die Strukturmasse bieten. Außerdem erlauben dünnwandige Strukturen die Auslegung auf besonders hohe Energieaufnahmen durch beispielsweise irreversible Falt- und Beulmechanismen. Ein Teil der relevanten Komponenten besteht auch aus voluminöseren Geometrien, die dann mit entsprechenden Volumenelementen abgebildet werden. Die dünnwandigen Strukturen werden mit Finite-Schalen Elementen diskretisiert. Diese räumliche Diskretisierung stellt einen Fehler bereit, denn die Aufteilung von Geome-

trie in viele kleinere Elemente bildet eine Annäherung. Zur Berechnung kommen nicht-lineare Finite-Elemente Solver zum Einsatz, die eine Lösung explizit oder implizit ermitteln. Dabei handelt es sich um mathematische Rechenverfahren, die mit einer zeitlichen und räumlichen Diskretisierung eine Lösung annähern. Eine der wichtigen Annahmen zur Funktionsweise der expliziten Verfahren liegt bei der Bestimmung der Geschwindigkeit. Denn wir gehen davon aus, dass für einen kurzen Zeitraum in die Zukunft die Geschwindigkeit der bewegten Körper gleich verbleibt und generieren damit einen weiteren Fehler. Der Fehler wird dann grundsätzlich mit einer kleineren zeitlichen Schrittweite reduziert. Wenn Falt- und Beulphänomene oder kleine Risse (Elementlöschung) abgebildet werden sollen, dann muss die Auflösung (Elementlänge) der Finite-Elemente entsprechend auch der Größe der kleinsten Risse gewählt werden. Kleinere Elemente führen zu größeren Steifigkeitsmatrizen und entsprechend zu höheren Rechenzeiten. In der Regel sind für bestimmte Materialkarden auch nur bestimmte Elementgrößen validiert. Das Verkleinern der Elementgröße führt somit zu anderen bzw. falschen Ergebnissen. Bei der Änderung von Elementgrößen in kleinere Elementlängen fällt eine Neigung zu weicher werdenden Strukturen auf oder entsprechend grobe Elemente weisen im Vergleich steiferes Verhalten auf. Die verwendeten Materialmodelle bestehen in der Regel auf Annahmen basierten Modellen. Außerdem können bei komplexen Materialbeschreibungen dehnratenabhängige Kurvenverläufe für verschiedene Belastungsgeschwindigkeiten hinterlegt werden. Grundsätzlich entstehen bei unterschiedlich schnell eingeleiteten Belastungen auch unterschiedliche Deformationsbilder, welche zusätzlich durch Massenträgheiten beeinflusst werden. Die Validität für Zugproben oder anderer Prüfkörper für beispielsweise Falltürme gewährleistet nicht gleich die Validität für geänderte Geometrie oder Änderung der Elementgröße. Ebenfalls erschwert die Rauschanfälligkeit der Simulationsmodelle bei Crash die Handhabung und anschließende erneute Evaluation von Ergebnissen. Durch die parallele Verwendung einer unterschiedlichen Anzahl an CPUs kann der Einfluss des Rauschens bei einheitlicher Hardware und gleichem Simulationsmodell an Einfluss gewinnen. Außerdem können bei Nutzung unterschiedlicher Hardware unterschiedliche Ergebnisse entstehen. Die Herausforderungen mit Blick auf die automatisierte Optimierung crashbelasteter Strukturen mit der nicht-linearen Finite-Elemente Berechnung basieren zusammengefasst auf verschiedenen Phänomenen:

- **Nicht-lineare Materialverhalten:** Die komplexen Materialmodelle, die einer Crashsimulation zugrunde liegen, erhalten nicht-lineare Spannungs-Dehnungsverläufe. Diese Verläufe können auch dehnratenabhängig sein.
- **Geometrische Nicht-Linearität:** Dazu zählen große Verformungen und Stabilitätseffekte, wie Kippen, Beulen und Knicken.
- **Kontakt zwischen Komponenten:** Bei der Simulation von Kontakt können zeitabhängig verschiedene Bauteilfronten aufeinander treffen und Gegenkräfte induzieren.
- **Simuliertes Versagen:** Versagen von Bauteilen kann in einer einfachen Form durch Löschen von einzelnen Finiten-Elementen erfolgen.
- **Diskretisierung in der Zeit:** Explizite Finite-Elemente Solver berechnen das mechanische Verhalten, approximiert über die Zeit.

Für die Auslegung werden große Datensätze und Korrelationstabellen benötigt, die den Aufwand zur Erzeugung von aussagekräftigen Modellen erhöht. Für Literatur zur Theorie von Schalenelementen sei an dieser Stelle auf Chapelle und Bathe, 2011, für Nicht-lineare Finite-Elemente auf Wriggers, 2013 verwiesen. Die Optimierung wird durch die folgenden Eigenschaften von Crashstrukturen und deren Simulationen erschwert:

- keine glatt über die Zeit verlaufenden Struktureigenschaften
- wenig verlässliche Materialdaten
- Streuung der Materialdaten
- netzabhängige Ergebnisse
- physikalische Verzweigungspunkte
- numerische Verzweigungspunkte

Abbildung 2.5 zeigt den Unterschied zwischen stabilen und instabilen Systemen mit Verzweigungspunkten leicht verständlich. Abbildung (a) und (b) zeigt eine Kugel auf einer abgerundeten Oberfläche mit verschiedenen Eigenschaften. Bild (c) zeigt einen axial belasteten Stab aus der technischen Mechanik. Wenn die Ausgangslage der Kugel in System (a) gestört wird, so fängt sich das System wieder und die Kugel entfernt sich nicht nennenswert vom Ausgangsort. Hier lässt sich leicht abschätzen, wie das System am Ende ausfällt.

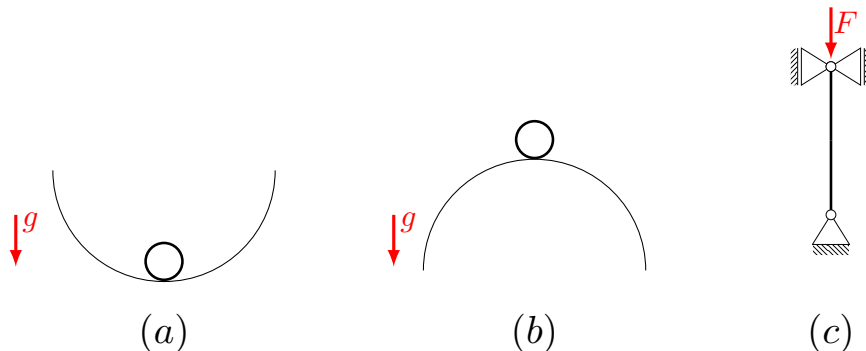


Abbildung 2.5: Stabiles System (a) und instabiles System (b). Axial belasteter Stab – kann zu verschiedenen Knickrichtungen führen (c) – Die Gravitationsbeschleunigung g entspricht 9.81 m/s^2

In System (b) würde sich die Kugel schon bei kleinen Störungen vom Ausgangsort entfernen und das System zeugt von Instabilität. Die Prognose, in welche Richtung sich die Kugel bewegt, gestaltet sich schwieriger. Die Kugel kann in verschiedene Richtungen fallen. Gleiches gilt für System (c) und für die Auslegung mechanisch belasteter Strukturen. Falls die axiale Druckbelastung für den Stab zu groß ausfällt, führt dies zu einem Stabilitätsverlust. Der Stab knickt aus. Die Komplexität erhöht sich bei der Erweiterung um die dritte Dimension mit beliebig vielen Richtungen deutlich. Die Unsicherheit resultiert aus einer Kombination von beispielsweise materieller Inhomogenität, geometrischer Ungenauigkeit und variabler Lasteinleitung. Für die Erhöhung der Prognosegüte können solche Systeme mit mehr Randbedingungen, Restriktionen oder Mechanismen bestückt werden, die einen dominanten Einfluss auf das Verhalten nehmen, begegnet werden.

3 Einführung in die Grundlagen der Strukturoptimierung

In diesem Kapitel werden grundlegende Begriffe und Arten der Strukturoptimierung erklärt. Die Erläuterungen schaffen eine gemeinsame Basis für wichtige Begrifflichkeiten. Einen Überblick über die weiterführenden Grundlagen zur Strukturoptimierung finden sich in Harzheim, 2019 und Schumacher, 2020.

3.1 Algorithmierte Strukturoptimierung

Die Strukturoptimierung ist als Entwicklungswerkzeug (Schumacher, 2020) zu verstehen. Überall dort, wo Verbesserungspotenzial besteht, kann Optimierung eingesetzt werden. Eine Struktur ist in diesem Zusammenhang ein System, welches für bestimmte Belastungen ausgelegt werden soll. Die Belastungen können mechanisch, physischer Natur sein. In Abb. 3.1 ist ein einfacher Optimierungsprozess skizziert.

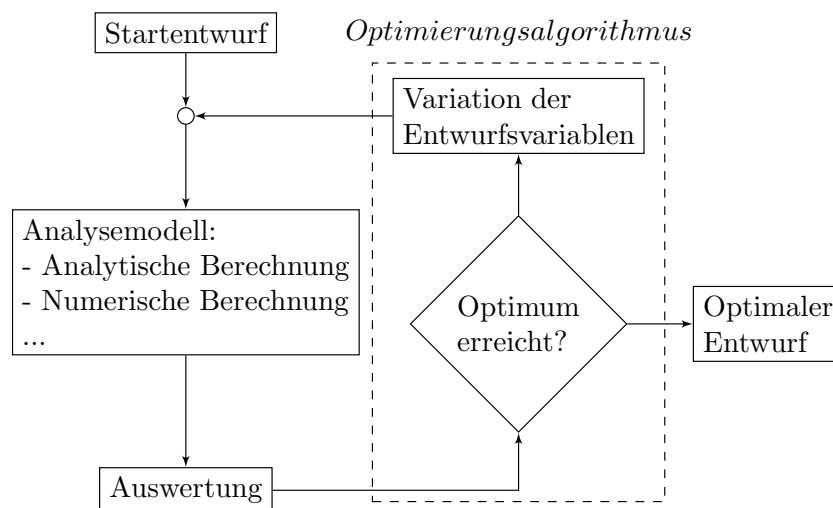


Abbildung 3.1: Optimierungsschleife, bestehend aus einem Analysemodell und dem Optimierungsalgorithmus, skizziert nach Schumacher, 2020

Darin ist zu erkennen, dass zentraler Bestandteil die Kopplung eines Modells für ein zu betrachtendes System und einem Optimierungsalgorithmus ist. Allgemein gesprochen liegt das Ziel der Strukturoptimierung darin, die Bauteileigenschaften hinsichtlich gegebener Ziele und Anforderungen zu verbessern. Das Modell muss variabel gestaltet sein, sodass wichtige bzw. einflussreiche Entwurfsvariablen strategisch nach einer festen Handlungsvorschrift

durch den Algorithmus geändert werden können. Die Vorgehensweise beinhaltet eine immer wiederkehrende Berechnung des Modells, bis ein Abbruchkriterium oder eine Höchstzahl von Iterationen erreicht wurde. Die Vielzahl so erzeugter Entwürfe sind Teil des Entwurfsraums, der durch untere und obere Grenzen der Variablen eingeschränkt wird. Zusätzlich können weitere Grenzen formuliert werden, die den Entwurfsraum weiter einschränken. Diese Einschränkungen werden Restriktionen genannt und können das mechanische Verhalten der Struktur betreffen oder Nebenbedingungen, wie Fertigungsrestriktionen geometrischer Art darstellen. Ein Auszug von Begrifflichkeiten zum Thema Optimierung findet sich in Tabelle 3.1 am Ende des Kapitels.

In der algorithmierten Optimierung werden in der Regel eine feste Anzahl an Designvariablen festgelegt und iterationsweise geändert. Für die Variation existieren verschiedene Herangehensweisen oder Strategien. Grundsätzlich kann zwischen lokalen oder globalen Verfahren unterschieden werden. Die gängigen Optimierungsverfahren unterteilen sich zu:

- **Suchrichtungsmethoden:** Diese Methoden bestimmen eine Richtung, in der sich der Funktionswert am schnellsten ändert. Dazu zählen beispielsweise *Duale Methode* oder *Simplex-Verfahren*.
- **Gradientenverfahren:** Sind Teil der Suchrichtungsverfahren. Hier wird mit lokaler Approximation durch das Bilden von Ableitungen aus der Zielfunktion an bestimmten Punkt gearbeitet. Über die Gradientenrichtung wird in negative Richtung verfahren. Als Beispiele können das *Gradientenverfahren (Verfahren des steilsten Abstiegs)* oder auch das *Newton-Verfahren* genannt werden.
- **Approximationsbasierte Verfahren:** Nähern beispielsweise mit einer begrenzten Anzahl an Stützstellen (Funktionsaufrufe) ein Verhalten an. Dazu kann *polynomiale Regression* eingesetzt werden. Auf Basis des Ersatzmodells können neue Stützstellen, Minimum oder Maximum bestimmt werden. Als Beispiele können *Response Surface Methoden* genannt werden.
- **Genetische und Evolutionäre Algorithmen:** Stellen Optimierungsverfahren mit stochastischem Anteil dar. Die Methoden benötigen keine differenzierbare Funktion, sondern nutzen eher Konzepte, wie Selektion, Rekombination und Mutation.

Problemstellungen bei der Auslegung von crashbelasteten Strukturen sind meistens eher hochgradig nicht-linearer Natur. Für diese Problemstellungen können Response Surface Methoden, Generische und Evolutionäre Algorithmen eingesetzt und als globale Optimierungsverfahren eingeordnet werden. Grundsätzlich wird der gesamte Designraum betrachtet bzw. abgetastet.

Im Bereich von Leichtbaustrukturen mit statischen Belastungen können Suchrichtungsverfahren für beispielsweise Wandstärkenoptimierungen mit dem Ziel einer Gewichtsminimierung eingesetzt werden, um eine ideale Materialausnutzung zu erzielen. Auch die Betrachtung von Eigenfrequenzen ist möglich. Weiterhin stehen dem noch andere Disziplinen gegenüber, wie die Lebensdaueranalyse und die Bewertung der Akustik. Diese Vielzahl an Anforderungen können oft nicht alle gleichzeitig berücksichtigt werden, aufgrund der dadurch stetig

steigenden Komplexität. Meistens werden auch unterschiedliche Solver und Modelle für die einzelnen Betrachtungen benötigt. Die Multidisziplinäre Optimierung (MDO – siehe Büttner, 2022) befasst sich als Strategie mit dem Ziel, Anforderungen verschiedener Gebiete, wie Crash, Steifigkeit und Betriebsfestigkeit zu erfüllen. Falls einige Anforderungen nicht im Optimierungsprozess berücksichtigt sind, müssen diese nach einer erfolgreichen Optimierung erneut evaluiert werden. Außerdem können während der Ausführung oder in der im Anschluss durchgeführten Evaluation von generierten Strukturen neue Erkenntnisse über Zusammenhänge von Einflussgrößen gewonnen werden und in die Entwicklung einfließen.

3.2 Arten der Strukturoptimierung

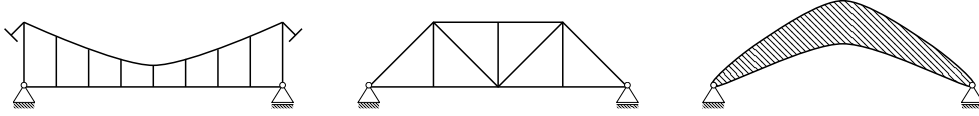
Die Problemstellungen der Strukturmechanik können mit verschiedenen Ansätzen der Optimierung behandelt werden. Die optimale Topologie für einen Lastfall ergibt sich aus dem eingesetzten Material. Außerdem besitzen die Wandstärke oder der Durchmesser von Streben und die Form jeweils einen Einfluss und sind voneinander abhängig. Folgende Ansätze können beispielsweise unterschieden werden (Schumacher, 2020):

- **Wahl der Bauweise:** Dabei handelt es sich um den grundlegenden Aufbau oder das Konzept, nach dem eine Struktur umgesetzt werden soll. Dazu sind beispielsweise Verbundstrukturen oder Blechstrukturen zu nennen.
- **Material:** Die Auswahl von Materialien stellt ebenso eine grundlegende Problemstellung dar, denn unterschiedliche Materialien führen zu unterschiedlichen Konstruktionslösungen.
- **Topologie:** Beschreibt die Anordnung von Material im Entwurfsraum, in dem auch die Entstehung von Durchbrüchen oder Löchern erlaubt sind.
- **Form:** Die Beschreibung der Entwurfsvariablen beschränkt sich dabei auf die Form, wobei die Topologiekategorie erhalten bleibt. Strukturen gleicher Topologiekategorie können demnach in unterschiedlicher Form auftreten.
- **Dimensionierung:** Beinhaltet Variablen zur Beschreibung von beispielsweise Wandstärken.

Die beschriebenen Arten zur Optimierung müssen nicht streng getrennt voneinander ausgeführt werden, sondern können auch in Kombination auftreten. Besonders bei Kombinationen zeigt sich in der Ausführung eine erhebliche Steigerung des Komplexitätsgrades. Grundsätzlich können für unterschiedliche Formen bei gleicher Topologie auch unterschiedliche Wandstärkenverteilungen optimal sein. Die Variabilität einer Struktur sollte jedoch stets nur so offen gestaltet sein, wie nötig. In Abbildung 3.2 ist die Klassifikation der Art in Abhängigkeit des Materials dargestellt:

Zu große Designräume, also die Kopplung von Topologie, Form und anderen Dimensionen, führen oft zu keinen Lösungen, da in der Regel zu wenige Informationen über die Abhängigkeiten bei einer Vielzahl von Entwurfsvariablen erzeugt werden können. Sind Abhängigkeiten

Wahl der Bauweise :



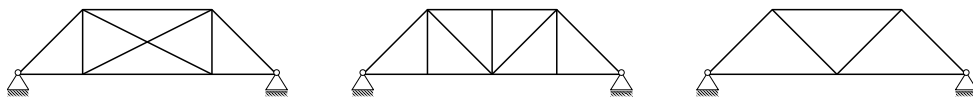
Wahl der Materialeigenschaften :

Verbundwerkstoffe

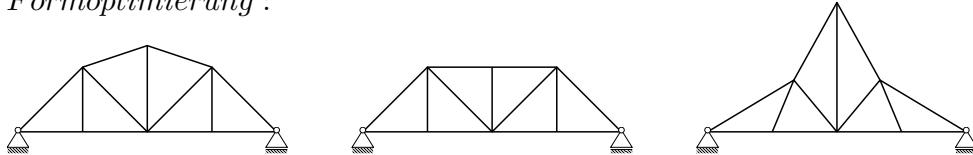
Stahl

Aluminium

Topologieoptimierung :



Formoptimierung :



Dimensionierung :

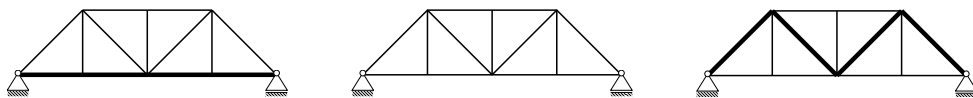


Abbildung 3.2: Klassifizierung von Strukturoptimierungsaufgaben nach Art der Entwurfsvariablen, skizziert nach Schumacher, 2020

bekannt oder lassen sich diese Abhängigkeiten schon zu Beginn abschätzen, sollten diese in den Aufbau des Optimierungsprozesses mit einfließen.

3.3 Ground Structure Approach

Eine der ersten Topologieoptimierungen für Stabtragwerkstrukturen wurde von Michell, 1904 ausgeführt. Hier sind die sogenannten „Michell-Strukturen“ entstanden, siehe Abb. 3.3. Die einzelnen Stäbe kreuzen sich rechtwinklig mit starren Verbindungen und sollen mit einer gleichen Spannungsverteilung für das geringste Volumen optimal sein, siehe Lewiński et al., 2011. Stäbe können im mechanischen Sinne lediglich Zug- und Druckkräfte übertragen. *Ground Structure Approaches* (GSAs) sind prinzipiell Verfahren zur Bestimmung der Topologie von Stabtragwerkstrukturen oder Fachwerken bei Minimierung des Volumens. Dabei werden Knoten über den gesamten Bauraum verteilt und jeder Knoten wird mit Stäben als vorläufige Verbindung vereinigt.

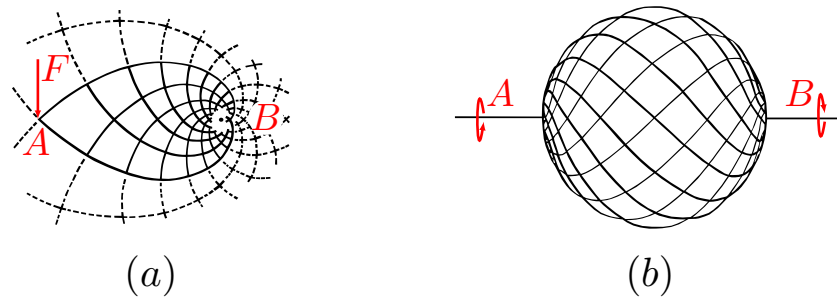


Abbildung 3.3: Biegebelastung durch die Kraft F (a); Torsionsbelastung (b), skizziert nach Michell, 1904

Das Knotennetz soll mit allen möglichen Kombinationen durch Stäben verbunden werden und darunter soll sich dann die optimale Struktur als Teilmenge befinden. Abbildung 3.4 zeigt die grundlegende Vorgehensweise. Um das Ziel des minimalen Gesamtvolumens zu erreichen, werden die Querschnitte der einzelnen Stäbe als Variable definiert und gleichzeitig muss die Gleichgewichtsbedingung in den einzelnen Knotenpunkten erfüllt sein. Weiterhin soll sichergestellt werden, dass sich die mechanischen Spannungen für alle Stäbe innerhalb der vordefinierten Grenzen befinden $\sigma_{min} \leq \sigma_{truss_i} \leq \sigma_{max}$, Hemp, 1974; Prager und Rozvany, 1977. Als Optimierungsverfahren kommen *Linear Programming (LP)*, *Nonlinear Programming (NLP)* oder *Sequential Quadratic Programming* zum Einsatz, auch dazu: Bendsøe et al., 1994; Kirsch, 1990; Rozvany et al., 1989. Viele der Arbeiten weisen zusätzlich Diskussionen über Singularitäten und Instabilität der gefundenen Lösungen auf.

Besonders interessant sind die zusätzlichen Betrachtungen zum Knickverhalten bzw. zur lokalen Knickrestriktion, M. Zhou, 1996.

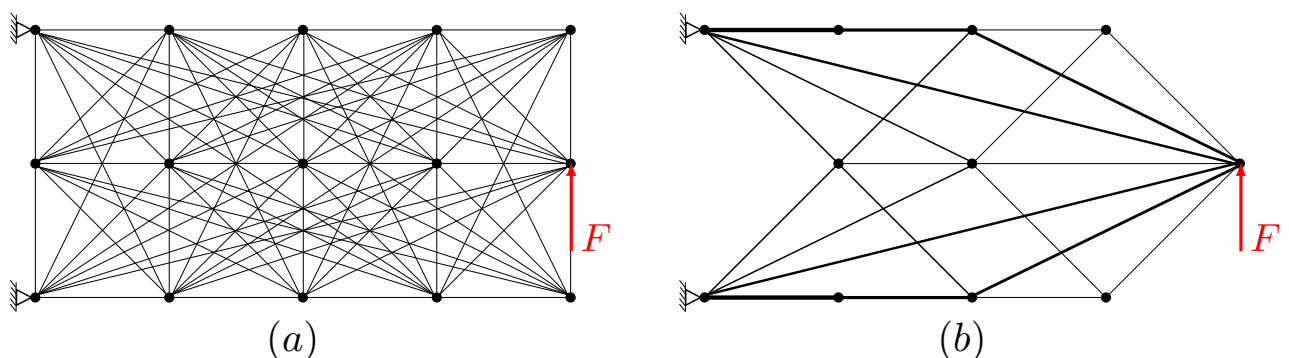


Abbildung 3.4: Ausgangsgeometrie mit allen Verbindungsmöglichkeiten und durch die Kraft F belastet (a); Mögliche Struktur als Teilmenge (b)

So werden bei Zugbelastungen lediglich die Streckgrenze des Materials für linear elastische Berechnungen berücksichtigt. Bei Druckbelastungen kommen hingegen zusätzlich noch Stabilitätsproblematiken, wie Ausknicken hinzu. Das Einbeziehen solcher Knickbedingungen, also um Ausknicken zu vermeiden, ist dabei ein wesentlicher Schritt für die Entwicklung

von Stabtragwerkstrukturen für reale Anwendungen. Dabei zeigt sich der besondere Einfluss der Stablänge. Durch Mechanismen, wie Deaktivieren oder Herauslösen von Stäben und bei Glattziehen von Knotenpunkten, ändert sich schlagartig die Länge durch das Zusammenführen aufeinander folgender Stäbe, welches eine sprunghaft steigende Knickneigung als Konsequenz beinhaltet, M. Zhou, 1996. Diese Problematik sorgt dann für Lösungen, die offensichtlich nicht optimal erscheinen, aber eher auf mehr Stabilität setzen. Von Rozvany, 1996 wurde eine globale Stabilitätsbedingung (Systemrestriktion) eingeführt. Die Demonstration findet an zwei vertikalen Stäben statt (siehe 3.5 (a)), die durch einen horizontalen Stab verbunden sind. Hier wird offensichtlich, dass der horizontale Stab im wirtschaftlicheren Ergebnis recht dünn sein kann und dient somit lediglich der Stabilität.

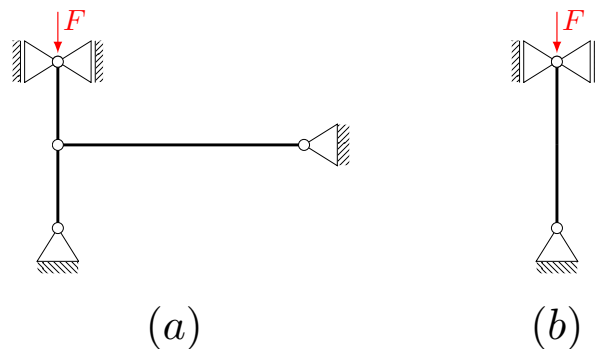


Abbildung 3.5: Stab mit horizontaler Abstützung und belastet durch F (a); Stab mit höherer Knickneigung, benötigt größeren Querschnitt (b), skizziert nach Rozvany, 1996

Dieses System ist einfach und überschaubar und zeigt auch, dass die Übertragung in die Realität wohl eher schwierig ist, denn der dünne Stab würde aufgrund der vom Eigengewicht eingeleiteten Biegung versagen. Außerdem wird argumentiert, dass die beiden vertikalen Stäbe niemals ideal verlaufen und dadurch weitere Kräfte in den horizontalen Stab einleiten. Achtziger, 1999 verwendet in seiner Entwicklung eine lokale Knickrestriktion als mathematische Formulierung und fügt eine Bewertung einer effektiven Knicklänge über die Verkettung von Stäben an Knotenpunkten hinzu.

Das theoretischen Konstrukte „Stab“ oder auch „Balken“ mit zusätzlich möglichen Biegebelastungen aus der technischen Mechanik lassen sich analytisch behandeln und stellen in erster Linie eine Modellreduktion dar. Diese Vorgehensweise und die Berechnung der Verschiebungen eines Stabtragwerkproblems (oder Balken) mit einer Vielzahl von Elementen kann in wenigen Sekunden ermittelt werden. Zur Parameterfindung können solche Balkenmodelle mit suchrichtungsbasierten Optimierungsalgorithmen gekoppelt werden. Die Fragestellung wird durch Systemrestriktionen, Knickbewertungen oder instabilen Lösung bei Spannungsrestriktionen deutlich komplexer. Zudem sind die Lösungen von der Definition von orthogonal fixierten oder flexiblen Verbindungsknoten und der Verwendung von Löschalgorithmen abhängig. Bei dieser Vorgehensweise müssen noch Herstellmöglichkeiten und die Umsetzung von Verbindungsknoten weiter überprüft und ggf. erneut detaillierter berechnet werden.

3.4 Topologieoptimierung: Dichtemethode

Die Dichtemethode zur Bestimmung von Materialverteilung mittels *Solid Isotropic Material with Penalization method* (SIMP, M. Zhou und Rozvany, 1991) innerhalb eines vorgegebenen Bauraums ist einer der bekanntesten Ansätze. Dem ging der Homogenisierungsansatz voraus, Bendsøe und Kikuchi, 1988. Bendsøe, 1989¹ beschreibt die Formoptimierung in ihrer allgemeinsten Form, worin für jeden Punkt im Raum bestimmt wird, ob dort Material vorhanden ist oder nicht. Beim Homogenisierungsansatz werden Zellen, die in ihrer Form variiert werden können, zusammenhängend im Bauraum verteilt. Jede Zelle stellt damit ein mechanisches Element als Teil zur Beschreibung des Strukturverhaltens dar und bildet in der Gesamtheit eine poröse Struktur. In Abbildung 3.6 links oben ist eine periodische Mikrostruktur abgebildet, die aus quadratischen Zellen mit quadratischen Löchern besteht. In jeder Zelle kann die Größe des quadratischen Lochs variiert werden und das für jede Zelle unabhängig. Somit ergibt sich in Abhängigkeit der Lochgröße für unterschiedliche Bereiche auch unterschiedliche Struktursteifigkeiten. Durch die Bestimmung der Sensitivitäten sollen durch die Kopplung mit Optimierungsalgorithmen optimale Materialverteilungen bestimmt werden.

Der SIMP-Ansatz umgeht diese physikalische Beschreibung einzelner Zellen und interpoliert die Finite-Elemente-Materialeigenschaften direkt. Dazu kann jedem Finite-Element ein theoretischer Dichtewert im Bereich $0 < \rho_t \leq 1$ zugeordnet werden, wobei dann das Elastizitätsmodul und die Materialdichte gesteuert werden. Entsprechend zur praktischen Strukturoptimierung ist der Wert 1 Vollmaterial und ein Wert gegen 0 eher kein Material. Zur Reduktion von Zwischendichten und zu besserer Interpretation lässt sich hier ein *Penaltyexponent* p (siehe Abb. 3.6 links unten) einstellen. Der Zusammenhang wird für ein E-Modul pro Element mit $E_e = \rho_t^p E_{\text{modul}}$ beschrieben. Die Anzahl der Designvariablen entspricht der Anzahl an Finite-Elementen und kann mit suchrichtungsbasierten Optimierungsalgorithmen gekoppelt werden. Dazu werden Algorithmen, wie die *Duale Methode* (Fleury, 1989) oder *Method of Moving Asymptotes – MMA* (Svanberg, 1987, 2002) verwendet. Mittels *MMA*-Verfahren werden Ziel- und Restriktionsfunktionen durch linear reziproke Approximationen ersetzt und daraufhin werden die Suchrichtungsmethode auf die konvexen Problemstellungen angewendet. Diese Optimierungsalgorithmen können eine hohe Anzahl an Designvariablen im Millionenbereich innerhalb dieser Optimierungsstrategie berücksichtigen. Bei der Anwendung treten in der Regel grundlegend nicht konvexe Problemstellungen auf und der Prozess kann daher in lokalen Minima enden.

Das Verfahren eignet sich hervorragend zur Optimierung für Ziele zur Minimierung der Nachgiebigkeit (Maximieren der Steifigkeit), wobei dann eine Volumenrestriktion zur Einschränkung des Entwurfsraums definiert wird. Außerdem existieren Möglichkeiten zur Berücksichtigung von aus fertigungstechnischer Sicht sinnvollen Einschränkungen, wie Auszugsrichtungen zur besseren Interpretation für Herstellbarkeit, ohne Hinterschnitte. Zwar müssen

¹Shape optimization in its most general setting should consist of a determination for every point in space whether there is material in that point or not.

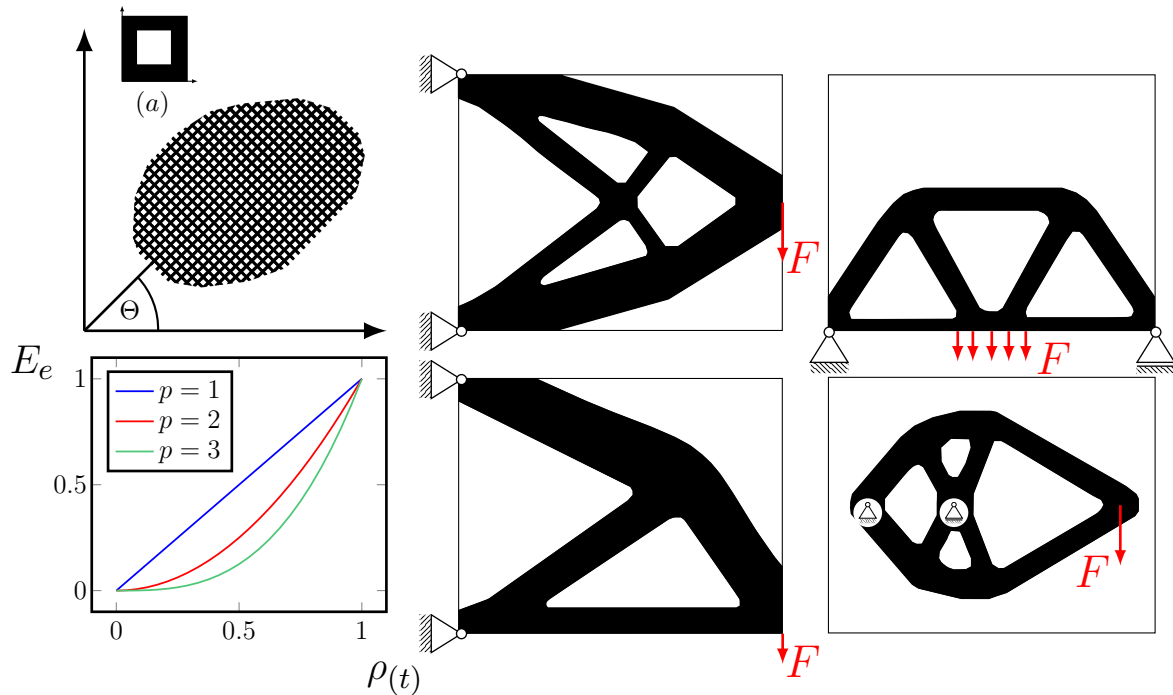


Abbildung 3.6: Periodische Mikrostruktur (oben links), skizziert nach Bendsøe, 1989; Materialinterpolation und Einfluss durch Bestrafung ($p > 1$) (unten links); Strukturen optimiert für einzelne Lastfälle mit dem SIMP-Ansatz, erzeugt mit Aage et al., 2013 (mitte, rechts)

die erzeugten Strukturen daraufhin noch in eine Struktur auf Produkt-Level entsprechend überführt werden und erneut die Struktureigenschaften bewertet werden, doch der Einsatz des Verfahrens ist mittlerweile in vielen Produktentwicklungszyklen fester Bestandteil. Die Methode erzeugt sehr flexible Lösungen für Strukturen mit statischen Belastungen und kleinen Verschiebungen mit linear elastischen Materialeigenschaften. Abbildung 3.6 (mitte und rechts) zeigt solche Lösungen für Materialverteilungen in zweidimensionaler Betrachtung und bei Verwendung einzelner Lastfälle mittels SIMP. Für dreidimensionale Strukturen werden Volumen-Elemente verwendet. Die Umsetzung des Verfahrens ist mittlerweile nicht nur auf spezielle Solver im Forschungsumfeld beschränkt, sondern findet sich in sämtlichen CAD-Programmen als Erweiterung wieder. Mittlerweile existieren Programmcodes, die frei zur Verfügung stehen oder Applikationen für das Smartphone zur Erzeugung von Strukturen, mit denen auch die Ergebnisse 3.6 mitte und rechts erzeugt wurden.

Tabelle 3.1: Erläuterung wichtiger Begriffe, alphabetisch sortiert, modifiziert und erweitert aus Schumacher, 2020

Begriff	Definition
Algorithmus	Stellt eine automatisierte Handlungsvorschrift dar, die aus mehreren Einzelschritten bestehen kann
Analysemodell	Mathematische Beschreibung eines zu untersuchenden Systems, Simulationsmodell
Approximation	Annäherung/Metamodell für ein System, bei dem der Verlauf geglättet ist und bei Stützstellen Abweichungen auftreten können
Bauraum	Der Bereich, für den ein Bauteil eingesetzt werden kann
Design-Bereich/ Design-Space	Bereiche, die durch den Einfluss der Entwurfsvariablen beeinflusst werden; zusammen mit dem Non-Design-Bereich bilden sie den Bauraum
Designvariable	vgl. Entwurfsvariable
Entwurf	Eine Variante mit einem konkreten Satz von Parametern; Vorgeschlagene geometrische Topologie; Ein Layout-Vorschlag der GHT3D-Methode
Entwurfsraum	Bereich, in dem die Variablen oder die Parameter angepasst/verändert werden können
Entwurfsvariablen	Die zu variierenden Konstruktionsgrößen oder Designvariable
Funktionsaufruf	Ermittlung/Berechnung des Zielfunktionswerts und den Restriktionswerten mit einem festgelegten Satz von Parametern
Gleichheitsrestriktion	Randbedingung, die nur einen exakten Wert als Teil der Lösung zulässt
Heuristik	Regelbasierter Ablauf zum Finden von Verbesserungen für ein Problem
Interpolation	Annäherung/Metamodell für ein System, bei dem der Verlauf durch die Stützstellen verläuft
Metamodell	Beschreibung für ein System auf einer abstrahierteren Ebene mit beschränkten Informationen als Grundlage

Begriff	Definition
Nebenbedingung	Mathematisch formulierte Forderungen als Randbedingungen, die einzuhalten sind (Restriktion)
Optimierungsalgorithmus	Verfahren mit fester Handlungsvorschrift zur Minimierung einer Zielfunktion, zusätzlich sollten Restriktionen berücksichtigt werden können
Optimierungsproblem	Zusammenfassung der Zielfunktion, Restriktionen und Entwurfsvariablen in einer geschlossenen Problemstellung
Optimierungsstrategie	Vorgehensweise insgesamt oder Reduktion komplexer Optimierungsaufgaben auf beispielsweise einfache Ersatzprobleme
Optimierungsverfahren/ -methode	Zusammenstellung der Optimierungsansätze und Optimierungsalgorithmen zur Lösung von Optimierungsaufgaben
Optimierungsprozedur/ -prozess	Software, computergestützte Abfolge zur Behandlung einer Optimierungsaufgabe
<i>Response Surface</i>	Approximierte Antwortfläche oder auch Metamodell
Restriktion	Mathematisch formulierte Forderungen als Randbedingungen und Einschränkung mittels ungleichem Relationszeichen dargestellt
Restriktionswert	Größe der Restriktionsfunktion
Sensitivität	Ableitung einer Struktureigenschaft nach einer Entwurfsvariable
Stützstelle	Variante des zu optimierenden Modells mit einem Satz an Parameterwerten und Zielfunktionswert
<i>Surrogate model</i>	Bezeichnung für Metamodell
Startentwurf	Startwerte der Entwurfsvariablen
Strukturantwort	Eine Eigenschaft der Analyse- bzw. des Simulationsmodells
Ungleichungsrestriktion	Randbedingung, die einen maximalen oder minimalen Wert als Grenze definiert
Zielfunktion	Formulierung eines oder mehrerer Ziele bzw. Auslegungsziele
Zielfunktionswert	Größe bzw. Wert der Zielfunktion

4 Optimierungsverfahren für crashbelastete Strukturen

4.1 Problemstellungen und Ziele

Aus den vorangegangenen Kapiteln wird in der Kürze ersichtlich, welche beteiligten Gebiete, Verfahren und Prozesse zur Optimierung von Strukturen durchlaufen werden können. Durch das übergeordnete Ziel der Insassensicherheit bei Personenkraftwagen (Pkw), resultieren auch einige Anforderungen an diese Verfahren. Die Beschleunigungsspitzen, die an den Insassen bei einem Aufprall entstehen können, müssen möglichst geringgehalten werden, um vor tödlichen Verletzungen zu schützen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit von steifen Strukturen einerseits und energieabsorbierenden Strukturen andererseits. Die vorderen und hinteren Bereiche des Fahrzeugs stellen solche Deformationszonen zur Energieabsorption dar, um möglichst viel kinetische Energie gleichmäßig in Deformationsenergie zu dissipieren. Der größte Teil der kinetischen Energie wird durch die plastische Verformung von Metallstrukturen absorbiert. Die physikalischen Größen, wie Beschleunigungen, Energien, Verschiebungen oder plastische Dehnungen müssen in der Simulation auswertbar sein und im Optimierungsprozess berücksichtigt werden können. Die Betrachtung der durchaus vielschichtigen Mechanismen kann zu einer adäquaten Auslegung von crashbelasteten Strukturen führen.

Numerische Simulationen zusammen mit iterativen Optimierungsverfahren finden seit Jahren im Entwicklungsprozess Anwendung und helfen dabei, die an ein Produkt gestellten Anforderungen zu erfüllen. Zur Layout Findung von Strukturen mit linear statischen Lasten und linear elastischen Materialeigenschaften werden häufig Topologieoptimierungsmethoden mit dem SIMP-Ansatz (siehe Kapitel 3.4) eingesetzt. Dieses Verfahren kann eine große Menge an Entwurfsvariablen verarbeiten, bei denen die Auswertung von Gradienteninformationen direkt mit Daten aus der Simulation erfolgt. Unter den Bedingungen, die in Kapitel 2.5 genannt werden, können Lösungsansätze wie der SIMP-Ansatz für crashbelastete Strukturen nicht eingesetzt werden. Die dynamischen Simulationen mit einer Diskretisierung über die Zeit, Kontaktproblemen, nichtlinearen Verformungen und Materialeigenschaften hindern die Verwendung von gradientenbasierten Optimierungsalgorithmen, da die Sensitivitäten bezüglich einer Zielfunktion nicht für jede Entwurfsvariable analytisch abgeleitet werden können. Eine weitere Schwierigkeit liegt an den deutlich längeren Deformationswegen. In dieser Zeit entstehen verschiedene Deformationsereignisse, die einen Einfluss auf die darauf aufbauenden Deformationsereignisse haben. Diese eventbasierte Deformation erschwert gänzlich die Abschätzung und Auslegung von crashbelasteten Strukturen.

4.2 Form- und Wandstärkenoptimierung

Grundsätzlich werden in jedem Optimierungsverfahren meist strategische Parameterstudien ausgeführt. Der Aufwand zur Flexibilisierung des Entwurfsmodells hinsichtlich der Designvariablen steigt von einfachen Parametern für einzelne Wandstärken bis hin zur komplexeren Beschreibung für Parametrisierung der Form von z.B. Oberflächen stetig an. Der Bedarf der benötigten Funktionsaufrufe nimmt mit steigender Anzahl an Parametern deutlich zu, damit die nötigen Abhängigkeiten durch Kombination von Parametern abgebildet werden können. Zur Lösung solcher Fragestellungen bei crashbelasteten Systemen, können evolutionäre oder generische Algorithmen und *Response Surface Methoden* (RSM, siehe Kapitel 8.5) eingesetzt werden. Diese Verfahren nähern sich iterativ durch eine begrenzte Anzahl an Funktionsaufrufen einer möglichen Lösung an. Die Besonderheit besteht darin, dass die Strategien „*Black-Box-Probleme*“ behandeln können. Die Eingangsgrößen werden strategisch geändert und im Anschluss werden die Ausgangswerte auf Verbesserung überprüft. Es bestehen grundsätzlich erst mal keine mathematischen Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen.

Generische und Evolutionäre Algorithmen

Diese Algorithmen simulieren grundlegend den Entwicklungsprozess der Natur und streben nach stetiger Verbesserung. Die Verwendung von Strategien aus der Natur bzw. des Evolutionsprozesses erscheinen aufgrund des allgegenwertigen „Erfolges“ als plausibel. Ein Beispiel hierfür könnte das Skelett eines Vogels sein, das sich durch seinen überwiegenden Anteil an Hohlknochen auszeichnet. Im Kern wird ein selektiver Prozess ausgeführt. Ein möglicher Ablauf ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

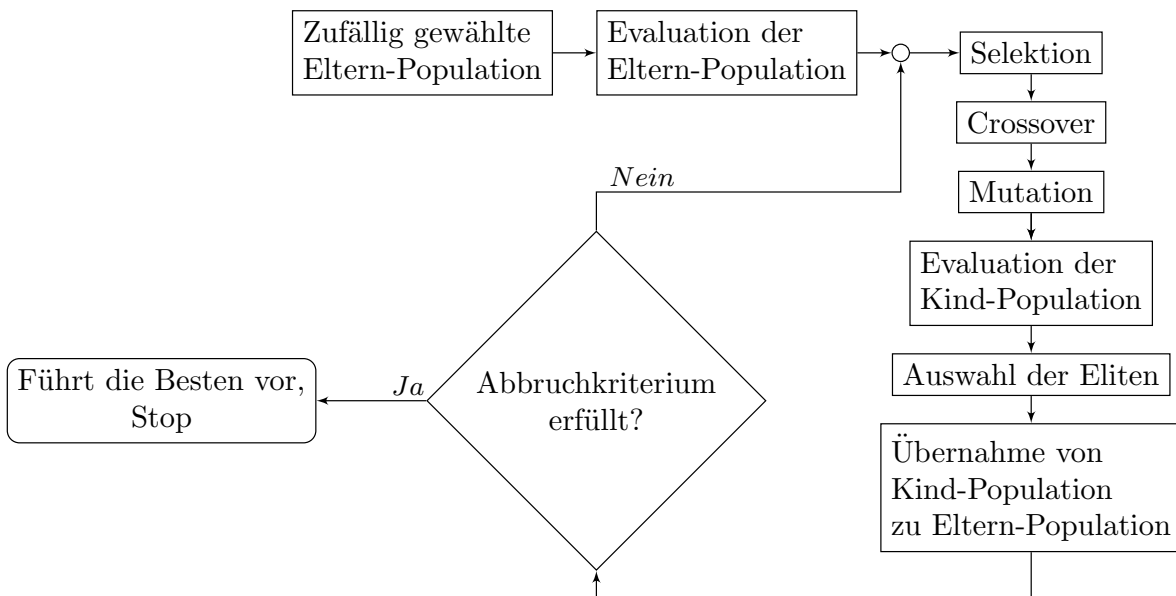


Abbildung 4.1: Grundlegender Ablauf von generischen Algorithmen, skizziert nach *Theory Manual – LS-OPT v7.0*

Eine Population von Individuen wird auf ihren Zielfunktionswert und auf die Einhaltung von Restriktionen hin bewertet. In diesem Zusammenhang wird von *Fitness* gesprochen und *Survival of the Fittest*. Individuen mit einem besonders guten Funktionswert werden für die nächste Iteration als Eltern ausgewählt (Selektion), die restlichen Entwürfe werden verworfen. In der neuen Iteration werden neue Individuen auf Basis der Parameter der zuvor gewählten Eltern erzeugt. Die Änderung geschieht durch Methoden, wie Rekombination (*Crossover*), Mutation oder stochastischen Zufallsanteilen. Außerdem können Strategien, wie Beibehalten von Gruppen mit Eliten und guten Eigenschaften eingesetzt werden. Besonders bei nicht-linearen Zusammenhängen innerhalb der Problemstellung können diese Verfahren grundsätzlich gute bis sehr gute Lösungen finden, soweit diese denn existieren.

Elemente aus der Prozesskette findet sich grundlegend im Prozess der GHT wieder, siehe Kapitel 4.4. Dazu zählen Selektion oder aber auch die Art von Kombination, die innerhalb der Entwürfen für neue Strukturanordnungen sorgt, wie Erzeugen oder Löschen. Zusätzlich lässt sich innerhalb des GHT-Prozesses auch ein *Generischer Algorithmus* von LS-OPT beispielsweise zur Form- und Wandstärkenoptimierung verwenden.

4.3 Topologieoptimierung

In diesem Kapitel werden einige Verfahren mit verschiedenen Methoden und Strategien zur Topologieoptimierung von crashbelasteten Strukturen aufgegriffen und erläutert. Die Übersicht erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, zeigt aber deutlich den hohen Anteil von heuristischen Regeln und Abläufen. Die Abschnitte sollen zum Teil aufzeigen, aus welchen Bereichen oder Gebieten die Verfahren entstammen und wie diese weiterentwickelt wurden.

4.3.1 Methoden der Hybrid Cellular Automata

Die erste Methode in dieser Reihe zur Optimierung von mechanischen Strukturen ist die *Hybrid Cellular Automata* (HCA). Dem gehen die Entwicklung und Generierung von topologisch geänderten Strukturen nach Methoden der *Cellular Automata* (CA) von Inoue et al., 1994; Kita und Toyoda, 2000 voraus. Die CAs dienen der Beschreibung räumlich endlicher Systeme und beschreiben Zustände von einzelnen Zellen im Zusammenschluss. Die Beschreibung der Simulation legt eine Synthetisierung des Verhaltens von beispielsweise Organismen nah. Dazu wird eine bestimmte Anzahl von Zellen in einer Nachbarschaft organisiert und jede Zelle bekommt lokale Regeln zugeordnet. Speziell zur Strukturänderung werden dazu Regeln des mechanischen Verhaltens implementiert. Zur Änderung wird das Elastizitätsmodul bei Belastungen in Abhängigkeit der Spannungen variiert und für diesen Fall werden Simulationen mit kleinen zulässigen Verschiebungen im elastischen Bereich verwendet. Auch Regeln für den Zustand von Leben oder Tod werden den einzelnen Zellen zugeordnet. Das bedeutet, dass sich Teile der Struktur in Abhängigkeit des E-Moduls deaktivieren und wieder aktivieren können. Durch die vorgegebenen Regeln soll sich dieser Zusammenschluss an Zellen selbst organisieren. Die Art der zellulären Automaten und Regeln geht auf den Ma-

thematiker John von Neumann zurück.

Die Einführung der *HCA* basierend auch auf einen Zusammenschluss von Zellen und finden sich in Tovar, 2004; Tovar et al., 2006. Die Definition der Zellen soll das Knochenwachstum als Verhalten synthetisieren. In der Umsetzung werden Regeln aus der Cellular Automata eingesetzt und Simulationen mittels Finite-Elemente einbezogen (*Hybrid*). Bei der Aktualisierung der Struktur wird eine Heuristik zur Bewertung der Dehnungsenergiedichte über die Finite-Elemente Methode für zwei- und dreidimensionale Strukturen verwendet. Ziel ist die Homogenisierung dieser Dichte innerhalb der Struktur. Dadurch werden keine Gradienten zur Optimierung benötigt. Weitere Arbeiten für kleine zulässige Verschiebungen im Deformationsverhalten finden sich dazu in Bochenek und Tajs-Zielińska, 2016.

Die Übertragung zu crashbelasteten Strukturen wurde von Patel, 2007 und Patel et al., 2009 eingeleitet und geschieht Voxel basiert. Das Ziel ist die Homogenisierung der maximalen inneren Energiedichte, diese wird pro Element ermittelt. Hierzu wird die Spannung σ über die elastische und auch plastische Dehnung integriert und soll die Spannungs-Dehnungs-Beziehung schrittweise linear annähern. Die crashbelasteten Strukturen werden hier direkt betrachtet. Die gleiche Strategie führt Mozumder, 2010; Mozumder et al., 2012 für dünnwandige Strukturen bei Verwendung von Schalenelementen fort. Ganz nach dem Schema der CA Methoden können mehrere Elemente einer Zelle angehören. Damit sollen Wandstärkeverteilungen für Finite-Elemente in der Fläche möglich sein. Die Strukturen werden mit expliziten Finite-Elemente Solvern berechnet.

Eine Änderung in der Gestaltung der einzelnen Zellen für dünnwandige Strukturen wurden von Hunkeler, 2013 mit der *Hybrid Cellular Automata for Thin-Walled Structures - HCATWS* eingeführt und von Duddeck et al., 2016; Zeng und Duddeck, 2017 behandelt bzw. erweitert. Die Schalen-Elemente sind zu Beginn in feste räumliche würfelartige Gitterstrukturen angeordnet und aufgebaut.

Von der Grundannahme her ist die Homogenisierung der inneren Energie erst mal durchaus eine gute Idee. Denn die Verteilung der Energie auf die gesamte Struktur, also das Nutzen jeglichen Materials zur Energieaufnahme, sollte somit leichte und effiziente Strukturen hervorbringen. Außerdem lässt sich im Verhältnis zu anderen Verfahren eine geringe Anzahl an Finite-Elemente Berechnungen festhalten. Schwierigkeiten bereitet der Begleitumstand, dass einige Mechanismen, also beispielsweise die plastische Reaktionen auf Belastungen für Anforderungen zur Energieaufnahme, deutlich komplexer sind und ggf. eine ungleiche Verteilung der inneren Energie innerhalb der Struktur nach sich zieht, obwohl ein fast optimaler Kraft-Weg-Verlauf gegeben sein könnte. Weitere Arbeiten zu HCA finden sich in Afrousheh et al., 2019; Aulig et al., 2018; Ramnath et al., 2019; Wang und Xie, 2020.

4.3.2 Äquivalente statische Ersatzlasten

Ein weiterer Zweig zur Optimierung von Strukturen mit dynamischen Lasten ist der Einsatz oder viel mehr das Bilden von statischen Ersatzlasten im iterativen Verfahren. Im Grun-

de soll durch das Bilden von Ersatzlasten der Umgang von dynamischen Lasten innerhalb von Gradienten basierten Verfahren, wie mit dem SIMP-Ansatz, ermöglicht werden. Im Folgenden werden einige Entwicklungspunkte in Bezug auf Äquivalente statische Ersatzlasten (*equivalent static load (ESL)*) aufgeführt.

Hauptsächlich zeigen die ersten Ansätze den Einsatz von statischen Ersatzlasten in der Optimierung von Stabtragwerksstrukturen Choi und Park, 1999 im Bauingenieurwesen, um dynamische Lasten, wie Vibrationen anzunähern. Denn die meisten realen Lasten sind dynamischer Natur. Die Motivation für diese Entwicklung entstand aus der damaligen Herausforderung bei deren Handhabung in Optimierungsverfahren. Die dynamischen Lasten werden mittels Modalanalyse durch äquivalente statische Lasten angenähert. Weiterhin sollte eine Alternative zur bisherigen Auslegung mittels dynamischer Sicherheitsfaktoren entstehen, dessen Grundlage eher unbestimmt ist. Denn im Bauingenieurwesen werden oft grundlegend statische Lasten als Ersatz angenommen und mittels dynamischen Sicherheitsfaktor zur Kompensation behaftet.

In Choi und Park, 2002; Park und Kang, 2003 wurden die dynamischen Lasten durch eine Reihe mehrerer äquivalente statische Lasten bestimmt, um kritische Zustände zu beliebigen Zeitpunkten abzudecken. Somit soll die Kontinuität durch diese Reihe von statischen Lasten zu verschiedenen Zeitpunkten approximiert werden. Idealerweise soll das Verschiebungsfeld im Simulationsmodell aus dynamischen Lasten, dem Verschiebungsfeld mit den statischen Lasten zu einem bestimmten Zeitpunkt entsprechen. Dazu wird als erstes ein nicht-lineares Simulationsmodell mit dynamischen Lasten berechnet und daraus dann die einzelnen Verschiebungen für eine Optimierung mit Strukturantworten für linear elastischen Modellen ermittelt.

Aufbauend auf dem Gedanken mit den eigentlich weniger berechnungsintensiven statischen Ersatzlasten, werden Methoden nach ESL zur Auslegung von crashbelasteten Strukturen eingesetzt (Park, 2010; Yi et al., 2012). Die Verschiebungen von stark deformierten Strukturen, wie sie in der Auslegung von crashbelasteten Strukturen vorkommen, sind ebenfalls Ziel bei den Einsatzmöglichkeiten. In der Ausführung mit äquivalenten Lasten zur Optimierung von crashbelasteten Strukturen wird mit zwei Ebenen im Optimierungsprozess gearbeitet. Auf der ersten Ebene wird in einer äußeren Schleife eine dynamische Crash-Simulation durchgeführt und in einer zweiten verschachtelten Schleife werden Simulationen mit linear-elastischem Materialverhalten berechnet. In der nicht-linearen Crash-Simulation werden mittels eines Funktionsaufrufes das nicht-lineare Verschiebungsfeld zu verschiedenen Zeiten bestimmt. Danach werden die Verschiebungen mit der linearen Steifigkeitsmatrix aus dem Modell für die linearen elastischen Rechnungen multipliziert, um die Knotenkräfte zu erhalten. Diese Knotenkräfte werden zu verschiedenen Zeitpunkten ermittelt und so ergeben sich für die innere Optimierung mehrere unabhängige Lastfälle. Das Ergebnis aus der inneren Schleife wird wieder in der äußeren Schleife mittels nicht-linearer Crashberechnung nachgerechnet. Diese Abfolge wiederholt sich iterativ. In der inneren Schleife kommen gradientenbasierte Topologieoptimierungsverfahren mit Zielen, wie minimiere die Nachgiebigkeit,

für mehrere Lastfälle zum Einsatz. Eine der Annahmen besteht darin, dass die einzelnen Lastfälle für kleine Verschiebungen mit der zu Beginn erstellten Steifigkeitsmatrix in ihrer Gesamtheit das Verhalten der Crash-Simulation abbilden können. Die Optimierungsziele sind auf Strukturantworten beschränkt, die mittels linear statischen Simulationen berechnet werden können. Wichtige Größen, wie Beschleunigungen, die aus Deformationsanteilen bei Crash entstehen, können in der inneren Schleife nicht berücksichtigt werden.

Der Anreiz liegt darin, dass die numerischen Kosten zur Ausführung der Optimierung und Auslegung von crashbelasteten Strukturen durch die Annäherung und Berechnungen mit linear-elastischem Verhalten eher gering ausfallen. Außerdem unterliegen nach wie vor reale Anwendungen dynamischen Lasten und nicht alle Bauteile müssen ein gewisses Energieabsorptionspotential besitzen.

Weitere Übersichten und Aktivitäten zur Verwendung von Äquivalenten Lasten finden sich in An et al., 2021; Duddeck et al., 2016; Karev et al., 2019; Kim et al., 2017; Lu et al., 2021; Park, 2011; Triller et al., 2021. In allen Ausarbeitungen finden sich Anwendungen zur Form- und Dimensionierungsoptimierung, sowie zur Topologieoptimierung mit geänderten Vorgehensweisen.

4.3.3 Ground Structure Approach - große Verformungen

Pedersen, 2003, 2004 schlägt einen *Ground Structure Approach* (GSA) (siehe Kapitel 3.3) für zeitabhängige Berechnungen von Rahmenstrukturen vor. In diesem Verfahren wird mit reduzierten Balken-Gitterstrukturen gearbeitet, um crashbelastete Strukturen zu optimieren. Jedem der eindimensionalen Balken wird ein quadratischer Querschnitt zugeordnet und das Verfahren erlaubt große Verschiebungen und große Rotationen. Außerdem besitzen die Balken eine Formulierung für Plastifizierung.

4.3.4 Einsatz von geometrischen oder materiellen Sensitivitäten

Die Forschungsaktivitäten konzentrieren sich auf Optimierungsmethoden, die einen sehr flexiblen geometrischen Lösungsraum zulassen. Ivarsson et al., 2018 verwenden eine adjungierte Methode zur Ermittlung der Sensitivitäten unter Einbeziehung eines linear isotropen Materialmodells mit begrenzter Dehnung. Bei diesem Ansatz sind die Sensitivitäten auf die Materialeigenschaften bezogen. Im Ansatz in Weider und Schumacher, 2018, 2019 und Weider, 2021, werden die Sensitivitäten für beispielsweise ein Verschiebungsfeld über eine adjungierte Methode ermittelt. Dabei werden die Sensitivitäten pro Element aus einer adjungierten Gleichgewichtsbedingung approximiert. Diese Sensitivitäten werden hier als topologische Ableitungen bezeichnet, da diese auf eine variable Fehlstelle oder auf ein variables Loch für einen Punkt im Raum bezogen sind.

4.3.5 Bidirectional Evolutionary Structural Optimization

Eine Strukturoptimierung mit belastungsgerechter Auslegung, die aus evolutionärer Sicht für möglichst spannungsarme Materialverteilung sorgen soll, wird als Begriff *Evolutionary structural optimisation* – ESO erstmals von Xie und Seffen, 2000; Xie und Steven, 1992 eingeführt. Der Ansatz erzeugt eine topologisch veränderte Struktur mittels der Betrachtung aus Vergleichsspannungen (von Mises) pro Element mit der Finite-Elemente Methode. Dabei werden schrittweise Elemente mit kleinen Spannungsverhältnissen im Vergleich zur Maximalspannung gelöscht, bis alle Spannungen der aktiven Elemente innerhalb, von hier im Beispiel genannten 25%, des Maximums liegen. Das Verfahren verfolgt das Ziel, Material mit wenig Spannungen zu entfernen, um eine möglichst effiziente Materialnutzung zu erzielen. Eine Erweiterung stellt die Bidirektionale Evolutionäre Strukturoptimierung (*Bidirectional Evolutionary Structural Optimization* – BESO) dar. Der BESO-Ansatz Huang und Xie, 2007; Querin et al., 1998 erlaubt zusätzlich zu dem Entfernen von Elementen mit wenig Spannung, die Reaktivierung von Elementen in Bereichen mit hohen Spannungen. Die Anpassungsfähigkeit soll die Effizienz und Flexibilität des Verfahrens steigern. Die Methode wird direkt auf den erzeugten Daten aus Finite-Elemente Simulationen angewendet und im Ergebnis wird eine Struktur aus 2D- oder 3D-Elementen iterativ erzeugt. In *Architecture and Urban Design through Evolutionary Structural* wird in der Einleitung ein Optimierungsergebnis eines hängenden Designraums gezeigt, aus der sich unter Eigengewicht ein Objekt formt, das an einen Apfel erinnert, siehe 4.2 Xie et al., 2011. Das Modell ist oben am Stiel fest eingespannt. Im Anschluss zeigen einige Anwendungsbeispiele Materialverteilungen für Brücken und Gebäudefassaden.



Abbildung 4.2: Objekt bildet sich aufgrund von Eigengewicht, welches an einen Apfel erinnert, skizziert nach Xie et al., 2011

Eine kritische Einordnung des Verfahrens im Vergleich zum SIMP-Ansatz (siehe Kapitel 3.4) wird von Rozvany, 2009 ausgeführt. Das ESO/BESO-Verfahren konkurriert hier in der Diskussion mit dem SIMP-Ansatz als Verfahren, welches in der Rohfassung Sensitivitäten und somit die Ableitungen der Zielfunktion nach der Designvariable nutzt und Bewertungen mittels Optimalitätskriterien zulässt. Das ESO/BESO-Verfahren wird unter diesem Gesichtspunkt als ineffizient eingestuft und weckt Zweifel an den Lösungen. Auch existieren alternative Verfahren, die schon eher Betrachtungen von Finite-Elemente basierten Spannungen mittels *SKO-Verfahren* verwenden, Baumgartner et al., 1992.

Ein Übergang zu einem Verfahren zur Auslegung von Strukturen mit hoher Energieabsorption, die an der Lasteinleitung eine begrenzte Verschiebung für ein Kraftniveau einhalten sollen, wurde von Huang et al., 2007 vorgestellt. Die Modelle besitzen eine nicht-lineare Ma-

terialformulierung und lassen große Verformungen zu. Dazu wird die absorbierte Energie pro Element maximiert. Außerdem wird in diesem Fall anstelle des Verhältnisses der Spannungen ein Energieabsorptionsverhältnis betrachtet. Das Verfahren lässt Entfernen und Hinzufügen von Material nach dem BESO-Ansatz zu. Durch die einfachere losgelöste Verwendung einer Heuristik, lassen sich Methoden auch mit wenig Hindernissen auf andere Anwendungsfelder übertragen. Die Funktionsfähigkeit für einzelne Fälle muss dennoch im Anschluss geprüft werden.

Eine weitere Anwendung zur Auslegung einer Crashstruktur wird von Bahramian und Khalkhali, 2020 gezeigt. Der Aufbau zeigt eine dünnwandige quadratische Crash-Dose mit einer Wandstärke von 1.5 mm , die in axialer Richtung belastet wird. Mittels BESO-Verfahren werden Löcher innerhalb der Finite-Elemente Strukturflächen erzeugt, um gezielt Material zu entfernen, welches ggf. nicht benötigt wird. Im Beispiel wird eine Maximierung der Energieabsorption angestrebt, bezogen auf das gesamte Volumen. Die Einflussnahme auf die Deformation durch Löcher wird in diesem Anwendungsbeispiel demonstriert.

4.4 Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung

In diesem Unterkapitel wird das Verfahren der GHT vorgestellt und auf wichtige Punkte eingegangen, die zur Betrachtung und Einordnung als wesentlich erscheinen. Speziell die Vorgehensweise im Verfahren der GHT für zweidimensionale Graphen zur Optimierung der Topologie von Profilquerschnitten aus stranggepresstem Aluminium diente als Grundlage für die Entwicklung des Verfahrens von dreidimensionalen Rahmenstrukturen.

Eine der Besonderheiten im Verfahren der GHT ist die Beschreibung der zu optimierenden Struktur durch einen mathematischen Graphen als abstrahierte Form. Die Beschreibung gibt Aufschluss darüber, in welchen Bereichen Material in strukturierter Form im Designraum erstellt werden soll und in welchen nicht. Den ersten Aufbau von Strukturen aus einem Graphen in diesem Zusammenhang befindet sich in: Olschinka und Schumacher, 2008; Schumacher und Olschinka, 2008. Als Anwendungsfall wurde eine Flugzeugsitz-Unterkonstruktion behandelt. Außerdem sind erste flexible topologische Manipulationen gezeigt. Die Prozedur besteht aus einer verschachtelten Optimierungsschleife. In dem Beispiel wurde das Verfahren mit einer Formoptimierung in der inneren Optimierungsschleife abgeschlossen. Zu den Zielen gehört die Auslegung von Strukturen mit dynamischen Belastungen. Der Beul-Index η zur Bewertung und Identifikation von Bereichen, in denen sich Stabilitätsverlust ereignen könnte, ermittelt sich wie folgt:

$$\eta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (1 - \delta_{ij}) \xi^{\frac{d_{ij}^2}{r^2}} \int_0^T |\Delta \vec{v}_{ij}| dt \quad (4.1)$$

Hier werden die relativen Bewegungen $\Delta \vec{v}$ von Finite-Elemente Knoten und deren Anzahl N betrachtet und mit den Distanzen d_{ij} über den Radius r und Distanzfilter ξ gefiltert.

Das δ wird als „Kronecker- δ “ bezeichnet und wird bei $i = j$ zu 1 und bei $i \neq j$ zu 0, Schumacher und Olschinka, 2008. Auch werden einige der grundlegenden Gedankengänge zur Beschreibung von Ereignissen oder Vorgehensweisen genannt, deren Beeinflussung zur Verbesserung der Struktur führen könnte. Dazu zählen beispielsweise:

- Reduktion von Eigenmoden
- Verbesserungen an Stellen, die Stabilitätsverlust aufweisen
- Entfernen von nicht belasteten Strukturteilen
- Nutzen einfacher Strukturen
- Erzeugen paralleler Strukturen im Bauraum

Diese Regeln stellen Leitsätze zur Erstellung neuer Produkte dar, die beispielsweise in der Konstruktion und Auslegung von Strukturen verwendet werden können. Dabei ist ersichtlich, dass die Verbesserung von Struktureigenschaften durch verschiedene Mechanismen erfolgen kann. Eine Weiterentwicklung des Verfahrens wurde von Ortmann, 2015; Ortmann und Schumacher, 2013, 2014 zur Auslegung crashbelasteter Strangpressprofile vorangetrieben. Dazu dient der mathematische Graph als geometrische Beschreibung des Querschnitts und sorgt für die nötige Flexibilität.

4.4.1 Zweidimensionale Graphenbeschreibung

Die Graphen-Syntax der GHT (Ortmann, 2015) ist ein besonders wichtiger Teil des Optimierungsablaufs. Im Grunde beinhaltet die Syntax eine Vorschrift oder Anleitung zur Erzeugung von Geometrie. Zur genauen Definition, wie diese Geometrie gestaltet werden soll, werden einige Informationen innerhalb des Graphen abgespeichert. Das Format soll sehr flexibel und in möglichst geringer Ablaufzeit ein rechenfähiges Finite-Elemente Modell mit unterschiedlichen Topologien erzeugen können. Die Verwendung eines zweidimensionalen Graphen zur Geometrierzeugung lässt durch die Extrusion in die dritte Raumrichtung ein dreidimensionales Profil zu. Die GHT erzeugt so Finite-Elemente Modelle für Strangpressprofile mit gleichbleibenden Querschnitt. Der zweidimensionale Graph wird durch Elemente beschrieben, wie *Vertices* oder *Edges*. Die *Vertices* bekommen zweidimensionale Koordinaten und die *Edges* setzen dann die Beziehung dazu. Außerdem sind Größen und Informationen im Graph gespeichert, wie Wandstärke, Material und Extrusionslänge. Überall dort, wo sich eine *Edge* befindet, wird eine Strukturwand im Finite-Elemente Modell erzeugt. Die Geometrie des Querschnitts kann dann über den Graphen modifiziert werden. Der Nutzen liegt in der strukturierten Darlegung und zusätzlich kann der Graph als Schnittstelle für beispielsweise Parameterstudien eingesetzt werden. In Abbildung 4.3 ist auf der linken Seite ein zweidimensionaler Graph dargestellt und auf der rechten Seite ein daraus extrudiertes Bauteil als Finite-Elemente Modell, welches mit Schalenelementen abgebildet ist. Jede neue Struktur wird somit ebenfalls neu vernetzt. Der Bauraum wird durch den Graphen selbst definiert. Das dargestellte Modell zeigt die Ausgangsgeometrie für das Verfahren. Der Graph wird iterativ durch verschiedene Methoden manipuliert und das automatisierte Finite-Elemente

Modell wird zur Datenerzeugung im Anschluss berechnet. Dazu werden auch Methoden zum Auftrennen von *Edges* und zur Erzeugung neuer Graphenelemente benötigt.

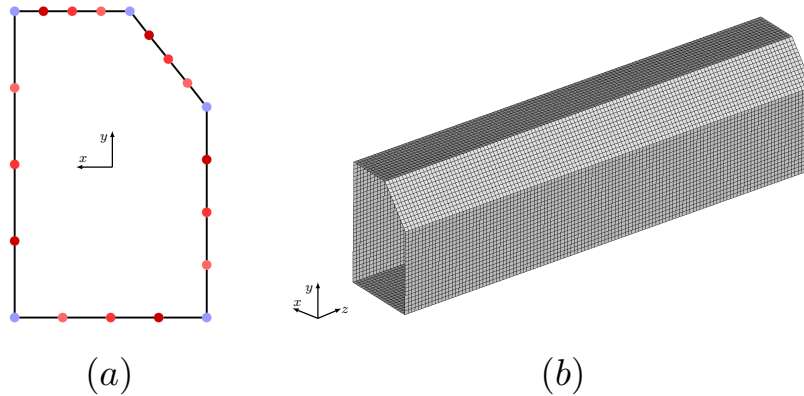


Abbildung 4.3: Zweidimensionale Graphendarstellung (a) und extrudiertes Finite-Elemente Modell (b)

Außerdem können je nach Situation und Bedarf die Symmetrie erzwungen, Formvariablen definiert oder umfangreichere Dimensionierungsoptimierungen ausgeführt werden. Diese Funktionen sind in einem automatisierten und iterativen Optimierungsprozess implementiert. Eine Einschränkung zur geometrisch korrekten Erzeugung, sodass nur herstellbare Strangpressprofile entstehen bzw. zugelassen werden, geschieht durch zusätzliche Algorithmen zur Überprüfung auf der Graphenebene:

- minimale und maximale Wandstärke von Wänden
- Mindestabstand von Strukturwänden mit Berücksichtigung der Wandstärke
- minimaler Verbindungswinkel zwischen Strukturwänden
- flächenbezogene Verhältnisüberprüfung zwischen großen und kleinen Kammern

Für die Umsetzung genügen beispielsweise das Bilden von zweidimensionalen vektoriellen Schnittlinien, der Vergleich von einzelnen Längenwerten von Wänden oder zugeordneten Skalaren für Wandstärken. Die Geometrie kann somit immer bei Erzeugung auf diese geometrischen Restriktionen hin kontrolliert werden. Ziel ist, das mechanische Verhalten bezüglich von gegebenen Crashlastfälle zu verbessern. Zur Generierung verschiedener Topologieklassen werden Heuristiken verwendet, mit denen vor allem die einzelnen Entwürfe verändert werden.

4.4.2 Heuristiken für laterale Belastung von Profilstrukturen

Die Heuristiken (Ortmann, 2015) sind Regeln, die aus Expertenwissen abgeleitet sind und zur Optimierung des Strangpressprofils eingesetzt werden. Einige der mechanisch intuitiven Regeln lassen sich ggf. auch auf andere Problemstellungen übertragen, wobei hier laut Ortmann, 2015 eine Einschränkung auf lateral crashbelastete Strangpressprofile erfolgt. Das Expertenwissen wurde durch die Befragung von speziellen Fachabteilungen abgeleitet (Schumacher

und Ortmann, 2013), die für die Auslegung von crashbelasteten Komponenten zuständig sind. Speziell auf die Heuristiken der GHT bezogen sollen einige Leitsätze zur geschickten Manipulation und Verbesserung der Struktur beitragen. Die verschiedenen Heuristiken stellen demnach Konzepte zur Detektion verschiedener Phänomene und mechanisch begründeter Manipulation dar. Dazu gehören zum Beispiel das Verhindern unkontrollierter Deformation. Bereiche, die im Vergleich schneller deformieren als andere, zeugen von schwachen Strukturanteilen. Auch die gleichmäßige Verteilung der Energiedichte wird angestrebt, vgl. auch die o.g. HCA-Methode. Dabei wird unterstellt, falls sich eine homogene spezifische Energiedichte innerhalb der Struktur bildet, eine recht effiziente Nutzung des Materials folgt. Folgende Punkte stellen einen Auszug dieser Sammlung dar:

- Identifizierung von Knicken und Unterstützung dieser Komponenten: Das Vorhandensein eines globalen Wandbeulens verringert die Steifigkeit grundlegend. Dazu sollen Knickkräfte durch Einziehen neuer Wände erhöht werden.
- Erhöhung der Ecksteifigkeit: Nicht steife Ecken haben Probleme mit der Biegung.
- Keine bogenförmigen Bauteile: Bögen sind wegen der Biegung nicht steif.
- Füllen von großen Ausschnitten: Große Ausschnitte können keine Verformungsenergie absorbieren, daher sollten diese Bereiche mit strukturellen Komponenten gefüllt werden.
- Wenn die Torsion zu groß ist, sollten kreisförmige Strukturen eingesetzt werden: Für die Torsion sind kreisförmige Strukturen am besten hinsichtlich Steifigkeit geeignet.
- Eine kleine Anzahl von Kammern verwenden.
- Homogenisieren der Knicklängen.
- Verwendung eines symmetrischen Aufbaus.
- Mäßige Änderung von Entwurfvariablen, wie beispielsweise der Wandstärke.

Die effektive Nutzung des Materials kann auch durch die Verbindung von Bereichen mit gegensätzlichem Deformationsverhalten unterstützt werden. Auch können Wände mit weniger innerer Energie wieder entfernt werden. Lös- und Deaktivierungsalgorithmen wurden auch schon im Bereich GSA und SIMP eingesetzt.

Das Verfahren der GHT bewertet verschiedene Situationen und führt damit unterschiedliche mechanisch begründete Geometrieänderungen automatisiert durch. Nicht alle Phänomene treten in verschiedenen Situationen in gleicher Weise oder in gleicher Stärke auf. Die Auswertung für schnelle Deformation und gegensätzliche Verschiebungen werden auf einer Schnittebene im Simulationsmodell ausgewertet. Diese Schnittebene wird Analyseebene genannt und liegt an der relevanten Position des Einschlagortes eines Impaktors. Jeder Manipulation liegt eine Simulation zur Erzeugung von Daten und einer darauf hin aktuellen Bewertung des vorangegangenen Entwurfs zugrunde. Die simulativ erzeugten Daten werden auf die einzelnen zweidimensionalen *Edges* projiziert. So lassen sich die *Edges* bewerten und miteinander vergleichen und auf Basis der gewonnenen Informationen können die Strukturen entsprechend verändert werden. Die daraus resultierenden Manipulationen haben zum Ziel, die strukturelle Integrität zu unterstützen. Die Heuristiken haben ebenfalls gemein, dass

beteiligte und benachbarte Strukturwände meistens im Verhältnis durch Gewichtung oder Normierung teilweise in die Bewertung mit einbezogen werden. Im Deformationsprozess von crashbelasteten Strukturen treten hohe innere Energien und Stabilitätsverlust nicht zwingend gemeinsam auf. Für die Verbesserung der Strangpressprofile werden idealerweise alle nötigen verschiedenen Phänomene betrachtet, ausgewertet und individuelle Verbesserungsmaßnahmen getroffen. Zu den Phänomenen zählen schnelle Deformationsgeschwindigkeiten infolge von Beulen, hohe auftretende innere Energie oder die Detektion von Schädigung, welche mittels Elementlöschung simuliert wird. Abbildung 4.4 zeigt einen sinnbildlichen Auszug der entwickelten Heuristiken zur Optimierung von crashbelasteten Querschnitten von Strangpressprofilen. Die Heuristiken erzeugen isoliert betrachtet im Einzelfall nicht immer bessere

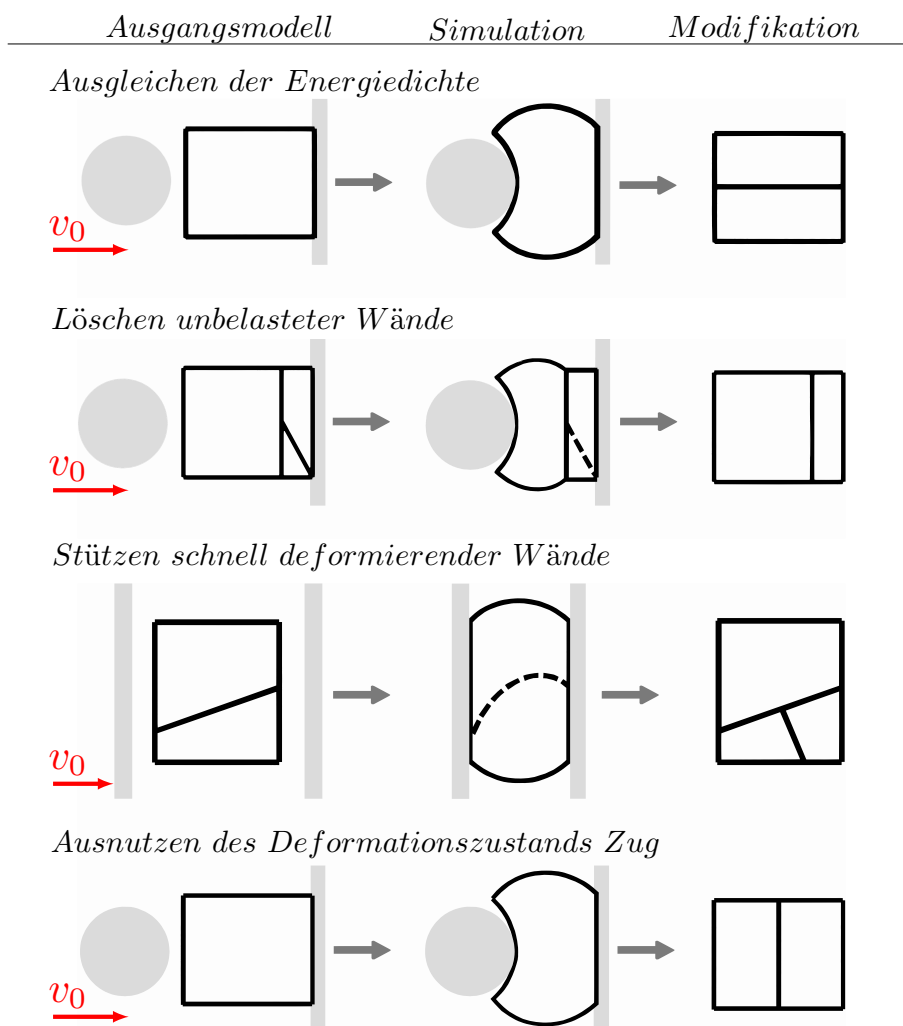


Abbildung 4.4: Auswahl von Heuristiken für verschiedene Situationen innerhalb von Querschnitten – bei unterschiedlichen Verhalten wird der Graph entsprechend unterschiedlich manipuliert, skizziert nach Ortman, 2015

Strukturen. Vielmehr leistet das Zusammenspiel verschiedener heuristischer Methoden, unter Einbezug von beispielsweise Wandstärkenoptimierungen einzelner Entwürfe, deutlich bessere Struktureigenschaften. Durch die detaillierte Abtastung einzelner Entwürfe, lassen sich über

den Zusammenhang von Topologie und Wandstärke, die Entwürfe innerhalb einer Iteration besser vergleichen. Der Optimierungsablauf und die Leistungsfähigkeit des Verfahrens wird im Folgenden kurz beschrieben bzw. demonstriert.

4.4.3 Optimierungsablauf und Anwendungsbeispiel

Das Verfahren (Ortmann, 2015) selbst wird mit zwei ineinander verschachtelten Schleifen ausgeführt. In der äußeren Schleife wird der zweidimensionale Graph durch die Heuristiken manipuliert und in der inneren Schleife werden die einzelnen Entwürfe mittels Wandstärkeevaluation detaillierter bewertet. Nur die besten Entwürfe werden in die nächste Iteration übernommen, ähnlich zur Selektion bei generischen Algorithmen, siehe Kapitel 4.2. Aufgrund von gewonnener Struktursteifigkeit kann die zu jedem Entwurf ausgeführte Wandstärkenoptimierung in der inneren Schleife zu einer Schwächung führen, um die Entwürfe näher an die geforderten Restriktionsgrenze der Intrusion zu führen. Daraus kann als Nebeneffekt die Strukturmasse stetig sinken. Durch Wandstärkenskalierung lassen sich je nach Bedarf auch Massenrestriktionen einstellen. Grundsätzlich kann durch die Evaluation von verschiedenen Wandstärken jedem Entwurf die nötige Masse hinzugefügt werden, bedingt durch das individuelle Strukturverhalten. Idealerweise wird ein Kompromiss zwischen Struktursteifigkeit und Nachgiebigkeit für längere Deformationswege gefunden. Als Verfahren für die innere Optimierungsschleife werden *Response Surface Methoden* oder *Evolutionäre Algorithmen* verwendet. Ein Beispiel (Ortmann, 2015, Beyer et al., 2019) zeigt, welche Topologie innerhalb eines Profilquerschnitts für ein Crash-Szenario entstehen kann. Das Anwendungsbeispiel (Abb. 4.5) stellt ein vereinfachtes Schwellermodell mit Sitzquerträger in abstrahierter Form dar.

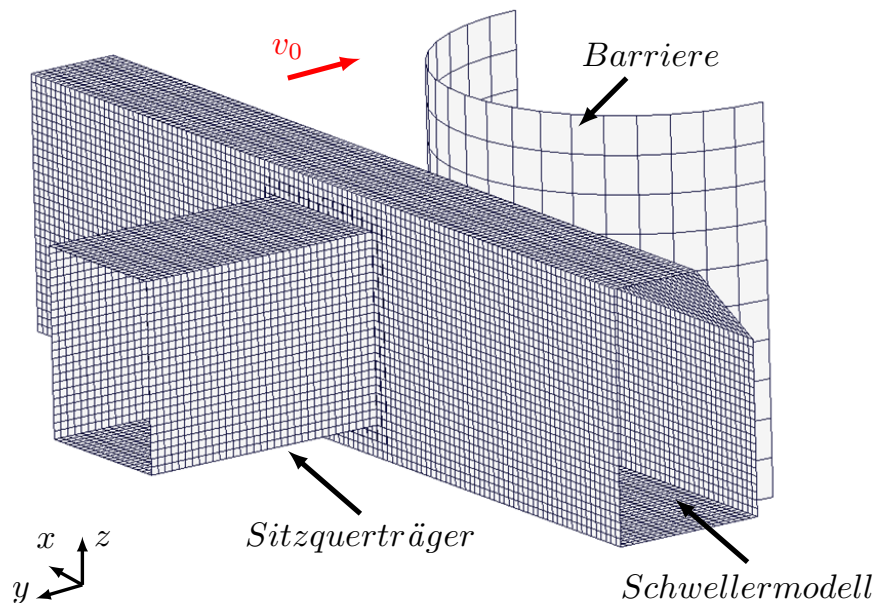


Abbildung 4.5: Initiales Schweller-Submodell mit Lastfall runder Barriere – angelehnt an den Lastfall seitlicher Pfahlaufprall aus der Fahrzeugentwicklung

Die Baugruppe befindet sich bei Personenkraftwagen seitlich im Bereich der Türen im Unterboden. Das stark reduzierte Submodell orientiert sich an einem Crashlastfall für Gesamt-

fahrzeuge und soll den seitlichen Pfahlaufprall abbilden bzw. annähern, siehe Kapitel 2. Die Ausgangsgeschwindigkeit v_0 beträgt 29 km/h und der Aufprall erfolgt mittig gegenüber dem Sitzquerträger gegen eine starre zylindrische Barriere. Die Maße des Modells betragen in der Höhe 160 mm , in der Breite 100 mm und die Extrusionslänge des Modells beträgt 600 mm . Der Schweller selbst ist an den Seiten durch Einspannungen in Lastfallrichtung geführt. Die kinetische Energie wird durch ein zusätzliches Gewicht von 85 kg am Sitzquerträger erhöht. Das Ziel des automatisierten Ablaufs stellt die schrittweise Minimierung der Kontaktkraft dar und soll die Struktureigenschaften für diesen Lastfall zur Energieabsorption verbessern. Die Intrusion ist mit einer zulässigen Verschiebung von 70 mm restringiert. Das Beispiel zeigt, wie die automatisierte und sauber vernetzte Geometrie in eine Baugruppe integriert und hochgradig dynamisch belastet werden kann, um als Ziel iterativ die Energieaufnahme zu verbessern. Der finale Entwurf ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

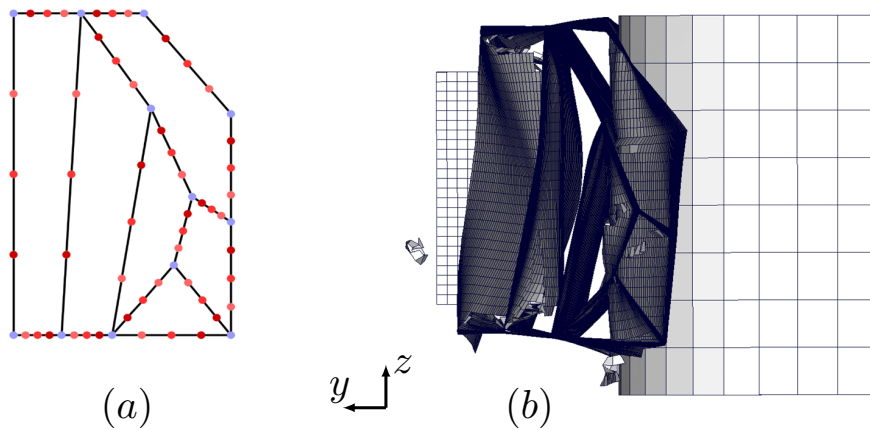


Abbildung 4.6: Geometrischer Querschnitt, abstrahiert durch den 2D-Graph (a) Ausschnitt aus Deformationsverhalten im finalen Entwurf – Abgebildetes Materialverhalten: Faserkunststoffverbund mit Versagen (b)

Das Verfahren hat für den finalen Entwurf mit komplexen Material- und Versagensmodell neun Iterationen benötigt. Der Kraft-Weg-Verlauf ist in Abbildung 4.7 dargestellt und zeigt die Kontaktkraft zwischen Schweller und Barriere. Aus diesem Beispiel ist ersichtlich, dass die Methode der GHT durch mittels verschiedener Heuristiken und Strategien in Kombination zu Ergebnissen führen kann, die aus Sicht der Energieabsorption sehr nah am idealen theoretischen Vergleichswert liegen. Besonders hervorzuheben ist der angestrebte Detailgrad, denn die internen Strukturwände werden für jeden Entwurf fehlerfrei für die Finite-Elemente Simulation modelliert. Außerdem werden die erzeugten Entwürfe auf geometrische Fertigungsrestriktionen überprüft. Zwar besteht kein Zusammenhang zwischen heuristischen Regeln und der Zielfunktion, doch durch die parallele Generierung verschiedener Geometrien kann der Designraum iterativ mit Strukturwänden gefüllt werden, um die Strukturen zu optimieren. Eine weitere wichtige Strategie stellt die Selektion von besten Entwürfen dar, die in die nächste Iteration übernommen werden. Im Beispiel wurden die besten 5 Entwürfe in die nächste Iteration übernommen. Denn so setzen sich die Strukturänderungen je Iteration durch, die geeignete Struktureigenschaften für mehrere Lastfälle aufweisen.

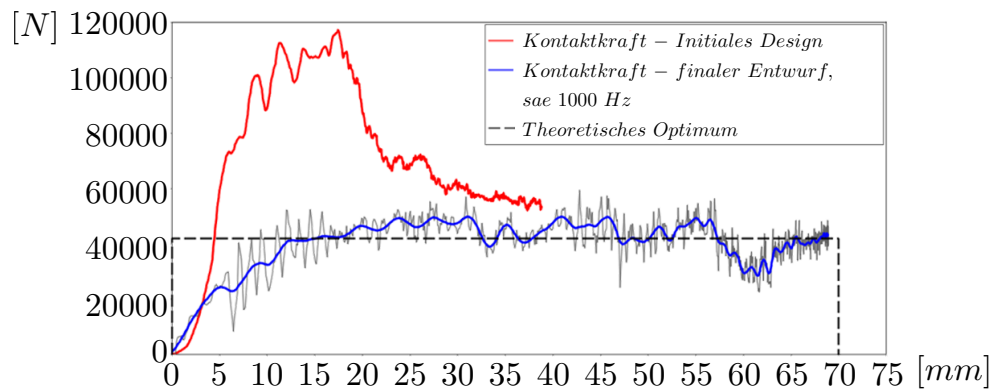


Abbildung 4.7: Kraft-Weg-Plot - Vergleich zwischen initialem Design und Ergebnis

4.4.4 Weiterführende Arbeiten

Eine Erweiterung der GHT stellt die Abwicklung bzw. Aufteilung in zusammengesetzte Blechstrukturen dar (Link et al., 2019). Damit ist das Verfahren nicht mehr auf Aluminium-Strangpressverfahren beschränkt. Für die Fertigung kann als Materialauswahl Stahl eingesetzt und mittels Biegeumformung in Form gebracht werden. Zusammengesetzte Blechstrukturen benötigen eine aufwändigere Berücksichtigung von Füge-techniken in der automatisierten Erzeugung. Für das Simulationsmodell stellt ein hoher Detailgrad eine wichtige Voraussetzung zur Abschätzung und Auslegung solcher Bauteile dar. Neben den automatisiert positionierten Schweißpunkten mit Versagen, muss eine Strukturänderung umfangreich auf eine Fertigbarkeit geprüft und beispielsweise als zusätzliches Blech in die Struktur integriert werden. Die Informationen von Ort und Art der erzeugten Flansche müssen dazu in die Graphen-Syntax integriert werden. Außerdem muss gewährleistet sein, dass die Schweißpunkte schrittweise von Schweißzangen im Fertigungsprozess erreichbar sind. Abbildung 4.8 zeigt ein Beispiel für die erfolgreiche Integration der Füge-technik mittels Flanschen im Optimierungsprozess. Die entstandenen Flansche können in zweifach oder dreifach überlappender Bauart auftreten.

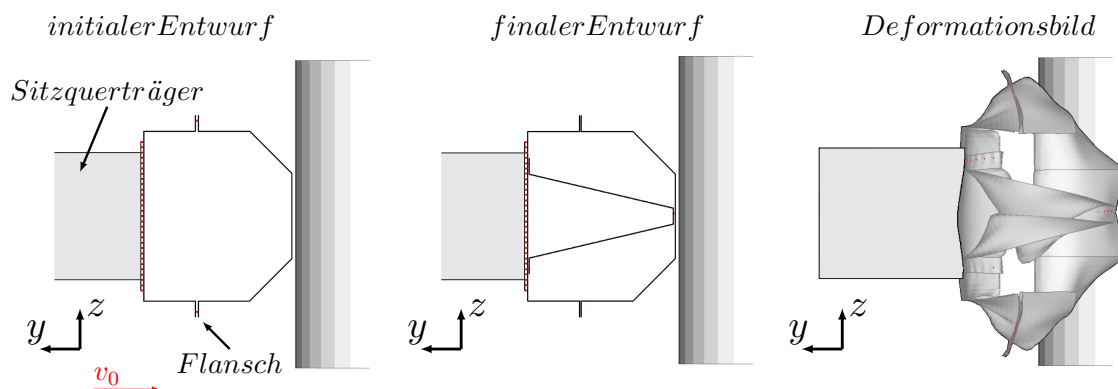


Abbildung 4.8: Aus Blechen zusammengesetztes Schwellermodell – Die Bleche werden mit Schweißpunkten gefügt. Der finale Entwurf beinhaltet die automatisierte Erzeugung und Integration eines neuen Blechs, Link et al., 2019.

Im Ergebnis konnte eine Hut-Profil-Struktur in den Designraum integriert und mit Flanschverbindungen versehen werden.

In Schneider et al., 2019, Schneider, 2023 wird eine Möglichkeit zur Erweiterung für die Optimierung von Faserverbundstrukturen gezeigt. Das Material bieten eine hohe spezifische Struktursteifigkeit bezogen auf die Masse. Durch die Variation von beispielsweise einzelnen Lagenstärken und Lagenrichtungen, wird die detaillierte belastungsgerechte Auslegung ermöglicht. Den Simulationsmodellen sind komplexe Materialmodelle mit Versagenskriterien zugeordnet und zwischen den Schichten sind ebenfalls Kontaktformulierungen mit Versagensintegration definierbar. Abbildung 4.9 zeigt ein Beispiel, bei dem die Topologie durch die Integration von gewickelten Kammern abgebildet werden kann.

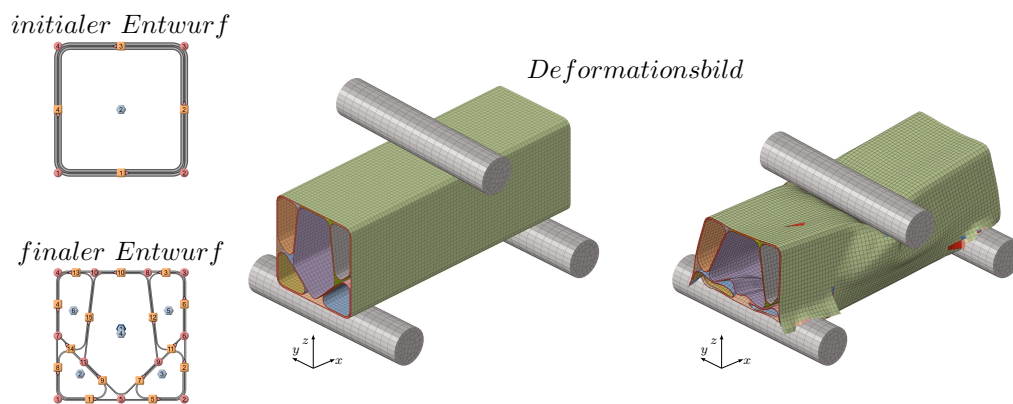


Abbildung 4.9: Faserverbundstruktur – Bezieht die Modellierung und fertigungsgerechten Strukturaufbau von gewickelten Mehrkammerprofilen für Wickelverfahren von thermoplastischen faserverstärkten Tapes mit ein, Schneider, 2023.

Die Darstellung zeigt ein repräsentatives Modell, welches mittels Wickelverfahren von thermoplastischen faserverstärkten Tapes gefertigt werden kann. Außerdem bietet die Berücksichtigung von Lagenaufbau und den daraus gewickelten Kammern neue Möglichkeiten zur Änderung auf das Strukturverhalten durch neue Lagenheuristiken.

Die verschiedenen Vorgehensweisen zeigen deutlich, dass für die individuelle Entwicklung detaillierte Modellerzeugung zur Abbildung der Sachverhalte unabdingbar ist. Eines der Ziele ist der Einbezug von Fertigungsrestriktionen, glatte Strukturen, die idealerweise dem Produkt-Level entsprechen und das grundsätzlich wenig bis keinen Interpretationsspielraum zulässt. Die automatisierte Aufbereitung der Modelle ermöglicht die Auswertung von einer Vielzahl an Varianten. Der Einfluss und die Berücksichtigung von Fügetechnik und Materialauswahl im Optimierungsprozess sorgt für deutlich mehr Modell- und Optimierungstiefe durch die genauere Berücksichtigung des Versagens im Material und an den Verbindungspunkten. Die Komplexität steigt dadurch auf einen sehr realen anwendungsbezogenen Grad an. Weitere Veröffentlichungen zur GHT für Profilstrukturen und zur Fertigung mittels Strangpressverfahren findet sich in Ortman et al., 2021 und Sperber, 2022.

5 Flexible Graphenbeschreibung für 3D-Rahmenstrukturen

Im Folgenden werden relevante Grundlagen erläutert, die zur automatisierten Erzeugung der Grundstruktur (Schumacher und Beyer, 2020 und Beyer et al., 2021) aus der Graphenbeschreibung benötigt werden. Zuerst werden allgemeine Grundlagen von Eigenschaften vorgestellt, die ein Graph beinhaltet. Danach wird die für die dreidimensionale Graphen-Syntax verwendete Variante im Detail erklärt. Am Schluss dieses Kapitels wird ein Beispiel gezeigt, in dem ersichtlich wird, wie eine Graphen-Datei gestaltet sein kann und wie die Geometrie bis zum Finite-Element erzeugt wird.

5.1 Graphentheorie

Die Graphentheorie ist ein Teilgebiet der Mathematik, das verschiedene Beziehungen und Eigenschaften von Graphen untersucht. Ein Graph besteht aus einer bestimmten Menge von Knoten und Kanten. Eine Kante verbindet jeweils zwei Knoten miteinander und stellt eine Beziehung dazwischen her. Mit der Graphenbeschreibung können Problemstellungen in abstrahierter Form abgebildet werden, wie beispielsweise aus dem Straßenverkehr. Orte und Straßen werden den einzelnen Elementen des Graphen zugeordnet. In diesem Zusammenhang stellt sich beispielsweise die alltägliche Frage nach der kürzesten Route. Die Lösung des Problems wird dabei auf der Graphenebene algorithmiert generiert, indem die kürzesten Pfade als Verbindungen zwischen je zwei Knoten ermittelt werden. Die grafische Darstellung von Graphen ist beliebig. Jeder Graph lässt sich in unendlich vielen Darstellungsformen in einer zwei dimensional Ebene darstellen. Eine einfache Form stellt die Abbildung 5.1 dar.

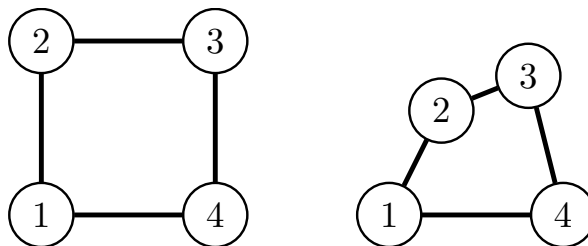


Abbildung 5.1: Zweidimensionale Graphendarstellung

Die Knoten werden durch Kreise mit einer individuellen Nummerierung skizziert und die Beziehungen werden durch Linien symbolisiert. Die unterschiedlichen Darstellungsformen

kommen durch die nicht definierte Positionierung der verschiedenen Knoten zustande. Die Graphen werden durch die Menge der Knoten $Vertices = \{1, 2, 3, 4\}$ und die Menge der Kanten $Edges = \{(1, 2); (2, 3); (3, 4); (4, 1)\}$ definiert. Zwischen zwei verschiedenen Knoten können auch mehrere Kanten existieren. Diese werden dann als Mehrfachkanten oder Multikanten bezeichnet. Ein Graph gilt als einfach oder schlicht, wenn der Graph keine Mehrfachkanten oder Schleifen, also Kanten, die als Knotenpaar zwei identische Punkte definiert haben, aufweist. Wenn die Reihenfolge der Knoten innerhalb der Knotenpaare, welche die Kanten bestimmen, beliebig ist, dann handelt es sich um einen ungerichteten Graphen. Sollte es sich um einen gerichteten Graphen handeln, dann wird die Orientierung der Kanten durch eine feste Reihenfolge der Knoten beschrieben. In der skizzierten Darstellung kann die Orientierung durch einen Pfeil am Ende der Kante erfolgen.

In Abbildung 5.2 ist ein Graph für drei Dimensionen dargestellt. Für die Anordnung gilt entsprechend für die Menge der Knoten $Vertices = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ und der Menge der Kanten $Edges = \{(1, 2); (2, 3); (3, 4); (4, 1); \dots; (5, 6); (6, 7); (7, 8)\}$.

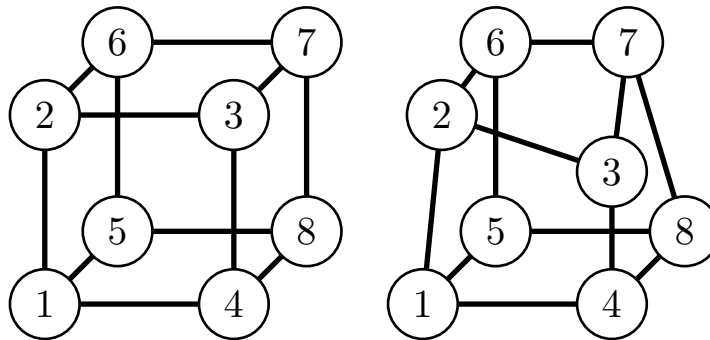


Abbildung 5.2: Dreidimensionale Graphendarstellung

In dem Verfahren der GHT3D wird die Struktur durch einen mathematischen dreidimensionalen Graphen abstrahiert. Dazu werden Informationen gespeichert, wie die geometrische Lage oder auch Informationen, die für Simulationsmodelle wichtig sind. Überall dort, wo eine Beziehung zwischen zwei Konten gesetzt ist, wird Material erzeugt. Der Aufbau der Graphen-Syntax kann individuell und flexibel definiert bzw. gestaltet sein. Die Gestaltung der Geometrie definiert sich durch ein Anwendungsproblem.

Für die GHT3D erfolgt der Aufbau durch zusammengesetzte Profile, um eine Rahmenstruktur zur dreidimensionalen Layout-Findung zu erzeugen. Topologische Änderungen sind mit einfachem Auftrennen und Setzen neuer Verbindungspunkte und Kanten möglich. Zusätzlich können je nach Definition weitere Informationen oder Eigenschaften den einzelnen Elementen zugeordnet und mit übergeben werden. Dazu zählen verschiedene Materialien oder Wandstärken oder ob eine Extrusion an Bahnkurven erfolgen soll. Geometrische Restriktionen, wie Längen oder Verbindungswinkel, aber auch die kürzeste Strecke, können durch verschiedene Algorithmen auf der Graphenebene überprüft und berücksichtigt werden. Die Vorgehensweise und die verwendete Syntax werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

5.2 Dreidimensionale translatorische und rotatorische Transformation

Eine der wichtigen Funktionen, für die grundlegende Ausführungen der Modellerzeugung aus dem Graphen, ist der Umgang von Punkten im dreidimensionalen Raum. Aufgrund der Relevanz wird dieser Umgang in kurzer Form dargestellt, um diese Wertigkeit hervorzuheben. Die geänderte Position durch Translation und Rotation wird Transformation genannt und findet in einem ortsfesten Bezugssystem im kartesischen Koordinatenraum statt. Ebenso zählen die globale Skalierung, Skalierung in unterschiedlichen Raumrichtungen, Transvektion oder Reflexion dazu. Die Translation wird durch einen Vektor \vec{t} bestimmt und die translatorische Verschiebung von Punkten mit \vec{p}_i folgt nach $\vec{P}_i = \vec{t} + \vec{p}_i$. Die Rotation im Raum kann um einzelne Ursprungsachsen mit folgenden Drehmatritzen bestimmt werden:

$$\mathbf{R}_1(\psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ 0 & \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$\mathbf{R}_2(\varepsilon) = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon) & 0 & \sin(\varepsilon) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varepsilon) & 0 & \cos(\varepsilon) \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$\mathbf{R}_3(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Die Koordinaten-Transformationen kann auf einer Menge an Punkten angewendet werden, deren relative Beziehung bei gleichen Rotationswinkeln zueinander erhalten bleibt. Die Anwendung geschieht dem nach mit $\vec{P}_i = \vec{t} + \vec{p}_i \cdot \mathbf{R}_1(\psi)$. Nach der Definition erlaubt $\mathbf{R}_1(\psi)$ eine Rotation um die X-Achse, $\mathbf{R}_2(\varepsilon)$ eine Rotation um die Y-Achse und entsprechend $\mathbf{R}_3(\phi)$ eine Rotation um die Z-Achse. Die zusätzliche Zeile und Spalte sorgt dafür, dass eine Koordinate der jeweiligen Rotationsachse unverändert stehend bleibt. Durch $\mathbf{R}(\psi, \varepsilon, \phi) = \mathbf{R}_1(\psi) \cdot \mathbf{R}_2(\varepsilon) \cdot \mathbf{R}_3(\phi)$ resultiert zu:

$$\mathbf{R}(\psi, \varepsilon, \phi) = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon) \cos(\phi) & -\cos(\varepsilon) \sin(\phi) & \sin(\varepsilon) \\ \sin(\psi) \sin(\varepsilon) \cos(\phi) + \cos(\psi) \sin(\phi) & -\sin(\psi) \sin(\varepsilon) \sin(\phi) + \cos(\psi) \cos(\phi) & -\sin(\psi) \cos(\varepsilon) \\ -\cos(\psi) \sin(\varepsilon) \cos(\phi) + \sin(\psi) \sin(\phi) & \cos(\psi) \sin(\varepsilon) \sin(\phi) + \sin(\psi) \cos(\phi) & \cos(\psi) \cos(\varepsilon) \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

und realisiert eine dreifache Drehung um die drei Ursprungsachsen. Wenn mehrere Rotationen nacheinander ausgeführt werden, muss zwingend darauf geachtet werden, dass diese nicht kommutativ sind. Die Änderung der Reihenfolge ändert somit den Ausgang. Um einen Vektor auf eine der Koordinatenursprungsebenen durch Rotation zu verschieben, kann der benötigte Winkel durch Projektion des Vektors auf eine orthogonal stehende Ebene ermittelt werden. Die Projektion erfolgt durch Reduktion auf zwei Dimensionen. Eine Rotations-

umkehr erfolgt durch eine umgekehrte Reihenfolge der Drehmatrizen und dem negativem Vorzeichen der Winkel oder mit \mathbf{R}^T .

5.3 Beschreibung der 3D-Graphen-Syntax

Eine der Hauptanforderung ist die Erweiterung der Graphenbeschreibung um eine dritte Dimension. Für diese strukturell umfangreiche Änderung wird eine dreidimensionale Graphen-Syntax eingeführt. Zu Beginn dieses Kapitels wird der hierarchische Aufbau der Graphen-Syntax-Struktur gezeigt. Im Anschluss werden einige Eingabeformate erläutert, die für die vollständige Erzeugung einer Rahmenstruktur verwendet werden.

5.3.1 Hierarchische Graphenstruktur

In Kapitel 4.4 wurden die Möglichkeiten zur geometrischen Erzeugung für einzelne Extrusionsprofils aufgezeigt. Die dreidimensionale Graphen-Syntax soll den bisherigen Stand erweitern und einen flexiblen Aufbau zur Beschreibung der Modelle ermöglichen. Der konzeptionelle Ansatz soll ein Finite-Elemente Modell erzeugen, welches eine Rahmenstruktur aus zusammengesetzten Profilen abbildet. Dazu wird ein übergeordneter *Graph3D* erstellt, dem die einzelnen *Edges3D* zugeordnet werden. Jede einzelne *Edge3D* stellt ein einzelnes Extrusionsprofil dar, dem wiederum ein zweidimensionaler Graph zugeordnet wird. Der untergeordnete *Graph2D* beschreibt den zweidimensionalen Querschnitt des Extrusionsprofils. Abbildung 5.3 zeigt die hierarchische Graphenstruktur. Die Zuordnung von individuellen Graphen erlaubt einen flexiblen Strukturaufbau mit unterschiedlichen Querschnitten. Neben der *Edges3D* werden eine Reihe von *Vertices3D* generiert, welche die Verbindungsknoten zwischen den *Edges3D* repräsentieren und im kartesischen Raum liegen. Gleiches gilt für den *Graph2D*, in dem die *Edges2D* die Beziehungen der einzelnen *Vertex2D* beschreiben und einzelne Strukturwände eines Extrusionsprofils darstellen. Die beiden Graphenvarianten werden mit der gleichen Syntax beschrieben und unterscheiden sich lediglich durch den Typ.

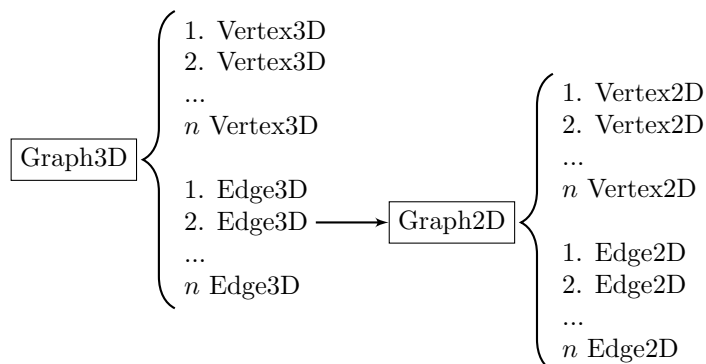


Abbildung 5.3: Hierarchische Graphenstruktur

Im Folgenden werden die Begriffe *Vertex* bzw. *Vertices*, sowie *Edge* und *Edges* für die Elemente des Graphen verwendet. Für eine vollständige Beschreibung neben der Geometriecharakterisierung durch *Edges* und *Vertics* bedarf es einer Reihe von Informationen,

die zur Durchführung der Berechnungen nötig sind. Dazu werden bestimmte Keywords eingeführt und den Graphenelementen zugeordnet. Die Keywords lassen sich bedarfsorientiert in beliebiger Reihenfolge in die Graphen-Syntax einfügen. Grundsätzlich werden eine Reihe von Redundanten *Keywords* für beide hierarchischen Ebenen verwendet. Der Erhalt von konsistenten Größen muss bei der Erstellung eines Graphen berücksichtigt werden. Dazu werden, ähnlich wie im Aufbau eines Finite-Elemente Modells, die physikalischen Größen ohne Nennung der Einheiten über die *Keywords* übergeben und durch Semikolons getrennt. Kennzeichnend für die Syntax ist, dass der *Graph* selbst als Element syntaktisch aufgeführt wird, um zwischen einzelnen Graphen zur Beschreibung von verschiedenen Querschnitten unterscheiden zu können. Im Folgenden werden die einzelnen Elemente aufgeführt und die Keywords mit den zu übergebenden Parametern dargestellt. Zur internen Identifikation werden die *Edges* und *Vertices* mit einer Spezifikation benannt, siehe Abbildung 5.4. Diese Namen erlauben Rückschlüsse der einzelnen Edges auf eine Konstruktionskomponente innerhalb der Simulationen und welche zweidimensionale *Edge* zu welcher dreidimensionalen *Edge(E)* zugeordnet ist. Weiterhin lässt die Spezifikation eine Umnummerierung für die Simulation in fest gelegte Bereiche zur Kompatibilität für andere Baugruppen zu. Die *Vertices(V)* erhalten entsprechend die Bezeichnung *G1xV3_1*.

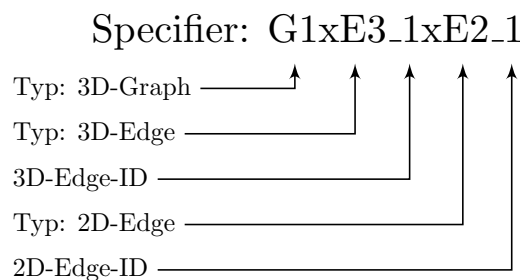


Abbildung 5.4: Beispiel für die Identifikationsbenennung der Graphenelemente

5.3.2 Graphen-Element

Das erste Element in der hierarchischen Graphenstruktur beschreibt die Art des Graphen. Tabelle 5.1 zeigt die Übersicht der möglichen Parameter.

Tabelle 5.1: Graph-Element - Graph3D/2D

Parameter	Datentyp	Erklärung
ID< <i>id</i> >	Integer	Identifikationsnummer
TYPE< <i>ty</i> >	String	Dient der Unterscheidung zwischen 2D- und 3D-Graph
SOURCE< <i>f</i> >	String	Unterverzeichnis für Querschnitte
NAME< <i>name</i> >	String	Bezeichnung eines Graphen
GRAPHSCALING< <i>s</i> >	Double	Skaliert den 2D-Querschnitt

Der vergebene Name wird gleichzeitig auch als Name der Finite Elemente *Inputdatei* verwendet. Zu den Parametern kann eine Graphenidentifikationsnummer vergeben werden, welche

individuell ist. Das Keyword *Type* definiert den Graph als zweidimensionalen oder dreidimensionalen Graph. Tritt der Typ *Grid3D* auf, so handelt es sich um einen Graphen, der eine dreidimensionale Rahmenstruktur abbildet, die aus mehreren Extrusionsprofilen besteht. Der Graph vom Typ *2DExtrusion* ist ein zweidimensionaler Graph, der den Querschnitt eines Extrusionsprofils beschreibt. Das *Graphscaling* kann zur Steuerung der Querschnittsdimension verwendet werden. Das Keyword *Source* wird dazu verwendet, um auf den Speicherort des zweidimensionalen Querschnitts zu verweisen.

5.3.3 Vertex-Element

Das Vertex-Element wird über das Keyword *Vertex* (Tabelle 5.2) identifiziert und stellt einen Strukturknoten innerhalb des 3D- und 2D-Graphen dar. Bei diesen Strukturknoten handelt es sich um Verbindungsknoten, die über das Keyword *Type* definiert sind. Wird ein Verbindungsknoten einem 2D- oder 3D-Graphen zugeordnet, erhält dieser eine Identifikationsnummer, die innerhalb des Graphen einmalig vorkommt.

Tabelle 5.2: Vertex-Element - Vertex3D & -2D

Parameter	Datentyp	Erklärung
ID< <i>id</i> >	Integer	Identifikationsnummer innerhalb eines Graphen
TYPE< <i>ty</i> >	String	Definiert den Vertex als Link-Knoten für 2D- und 3D-Graph
COORDINATES< <i>x, y, z</i> >	Double	Beschreibt die Lage im kartesischen Raum
THICKNESS< <i>t</i> >	Double	Weist eine Wandstärke zu
MATERIAL< <i>id</i> >	Integer	Weist eine Materialidentifikationsnr. zu
FIX< <i>fi</i> >	Boolean	Setzt einen Vertex auf fixiert
GROUP< <i>name/id</i> >	String/Integer	generiert Sets für FE-Output
ZONES< <i>name</i> >	String	Zur Aufteilung des Graphen
SPECIFIER< <i>name</i> >	String	Identifikationskennung

Durch die separate Nummerierung der Identifikationsnummern innerhalb der verschiedenen Graphen bleiben die Zahlen vom Betrag gering. Das Keyword *Coordinates* beschreibt die Lage der Strukturknoten im kartesischen Raum. Das Keyword *Fix* unterbindet die Variation der Wandstärke oder der Form an dem Verbindungsknoten im 3D-Graph.

5.3.4 Edge-Element

Die *Edge* (Tabell 4.3) beschreibt die Lage, Eigenschaften und den Verlauf eines Extrusionsprofils im 3D-Graphen. Wenn dieses Graphenelement einem 2D-Graphen zugeordnet wird, so wird eine Strukturwand im Querschnitt eines Extrusionsprofils erzeugt.

Tabelle 5.3: Edge-Element - Edge3D & -2D

Parameter	Datentyp	Erklärung
ID< <i>id</i> >	Integer	Identifikationsnummer innerhalb eines Graphen
VERTICES< <i>v</i> ₁ , <i>v</i> ₂ >	Integer	Definiert Start- und Endknoten
TYPE< <i>ty</i> , <i>a</i> ₁ , ..., <i>a</i> _{<i>n</i>} >	String	Definiert die Edge für den 2D- oder 3D-Graph, weist über <i>a</i> ₁ einen Querschnitt zu
LENGTH< <i>l</i> _{<i>s</i>} , <i>l</i> _{<i>t</i>} >	Double	Beschreibt die Längen zwischen Start und Ende des Profils zu den Vertices
ORIENTATION-VECTOR< <i>x</i> , <i>y</i> , <i>z</i> >	Double	Zur Ausrichtung des Profils im kartesischen Raum
MATERIAL< <i>id</i> >	Integer	Weist eine Materialidentifikationsnr. zu
THICKNESS< <i>t</i> >	Double	Weist eine Wandstärke zu
FIX< <i>fi</i> >	Boolean	Setzt eine Edge auf fixiert
GROUP< <i>name/id</i> >	String/Integer	Generiert Sets für FE-Output
ZONES< <i>name</i> >	String	Zur Aufteilung des Graphen
NURBS< <i>n</i> , <i>x</i> , <i>y</i> , <i>pos</i> , <i>g</i> >	Integer/Double	Definiert einen NURBS für 2D/3D-Graph
SPECIFIER< <i>name</i> >	String	Identifikationskennung

Die Identifikationsnummer wird einmalig innerhalb eines Graphen vergeben. Für jede *Edge* sind zwei *Vertices* notwendig, welche der *Edge* über das Keyword *Vertices* zugeordnet werden. Die so erstellte *Edge* ist gerichtet und verläuft vom ersten zum zweiten Vertex. Die Extrusionsrichtung wird dann relevant, wenn unsymmetrische Profilquerschnitte verwendet werden. Die Länge eines Profils oder einer Strukturwand ergibt sich direkt aus den Abständen der zugeordneten Strukturknoten. Als nächste Angabe wird über das Keyword *Type* zwischen einer *Edge* für einen 3D-Graphen oder einer *Edge* für den 2D-Graphen unterschieden. Dabei handelt es sich bei der Bezeichnung *ExtrudedProfile* um die Zuordnung eines Profils für den 3D-Graphen, gefolgt von einem zweiten Übergabeparameter, der für eine Zuweisung des Querschnitts verwendet wird. Für die zweidimensionale Beschreibung erhält die *Edge* die Bezeichnung *ExtrudedWall*, wobei dann kein weiterer Parameter benötigt wird. Das Keyword *Length* wird dazu verwendet, den Start- und Endpunkt des Extrusionsprofils zu steuern. Zur Vermeidung von Durchdringungen in den Verbindungsstellen, werden die Enden eingekürzt. Die Einkürzung der Extrusionsprofile wird für die Generierung der Verbindungsknoten vorausgesetzt und ist in Kapitel 5.6.1 beschrieben. Der Orientierungsvektor hat die Funktion, ein Profil im dreidimensionalen Raum um die eigene Profilachse auszurichten. Der Vektor zur Orientierung wird im nachfolgenden Kapitel 5.4 beschrieben. Die Ausrichtung kann Einfluss auf das strukturelle Verhalten haben. Des Weiteren wird über eine Materialidentifikationsnummer die Zuweisung einer Materialkarte für die Finite-Elemente Simulation angegeben. Ein möglicher Aufbau der Syntax ist in Kapitel 5.8 dargestellt, darin

wird die Graphen-Syntax aufgelistet und die daraus automatisiert erzeugte Geometrie dargestellt. Das Keyword *Fix* wird dazu verwendet, um Grenzen der Manipulation festzulegen. Auf diese Grenzen wird in Kapitel 6.4 eingegangen. Das Keyword *NURBS* zur Beschreibung von Bahnkurven der Extrusionsprofile wird in Kapitel 5.5 erläutert. *Edges* als Strukturwand muss eine Wandstärke zugewiesen werden und daher muss das Keyword *Thickness* definiert werden. Diese Angabe wird für den hierarchischen dreidimensionalen Aufbau für die übergeordneten *Edges* jedoch nicht benötigt, da ihr wiederum einzelne zweidimensionale *Edges* mit eigenen Eigenschaften im 2D-Graph zugewiesen sind. Für neue Anforderungen können syntaktisch neue *Keywords* mit neuen individuellen Merkmalen eingeführt werden.

5.4 Die Richtung und Orientierung von Profilen

Zur Erzeugung der zugehörigen Profilstruktur wird der Querschnitt durch rotatorische und translatorische Operationen zu dem Start der *Edge3D* verschoben und normal zu dieser ausgerichtet. Vor der Extrusion des Querschnitts zu einem Profil muss noch die Orientierung des Profils um die eigene Achse festgelegt werden. Dazu wird ein Orientierungsvektor eingesetzt, der die Ausrichtung der lokalen Y-Achse des Querschnitts im 3D-Raum festlegt. Die Orientierung wird mit dem Keyword *Orientationvector* (siehe Kapitel 5.3.4 Tabelle 5.3) in der Graphensyntax berücksichtigt. Die Wirkung des Orientierungsvektors zeigt sich in Abbildung 5.5, in der ein Extrusionsprofil dargestellt ist. Das Profil wird mit einem Orientierungsvektor $v_1(1,0,0)$ erstellt und die Ausrichtung erfolgt durch den zuvor mittels des zweidimensionalen Graphen definierten Orthogonalvektors.

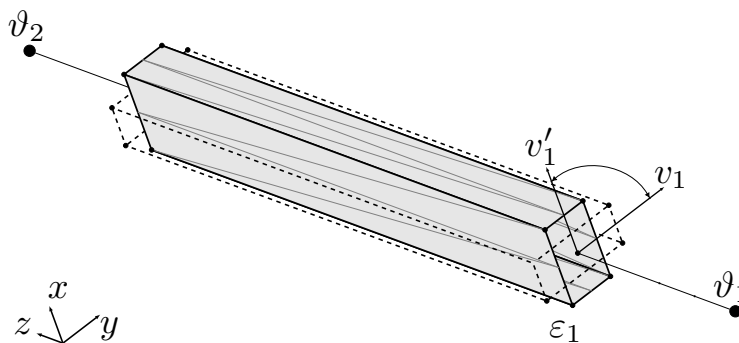


Abbildung 5.5: Steuerung der Ausrichtung durch den Orientierungsvektor an einem rechteckigen Profil zwischen den Vertices v_1 und v_2

Die Extrusionsrichtung verläuft entlang der Z-Achse. Danach wird über translatorische und rotatorische Koordinatentransformation das Profil entlang der *Edge3D* positioniert. Der Orientierungsvektor definiert die Ausrichtung des Profils um die eigene Achse. Hierbei wird das Profil so gedreht, dass die lokale Y-Achse in Richtung des Orientierungsvektors zeigt. Die Orientierung kann dazu genutzt werden, Profile belastungsgerecht auszurichten. Der Einfluss lässt sich beispielsweise über das Flächenträgheitsmoment bestimmen. Derzeit sind noch keine Regeln zur belastungsgerechten Ausrichtung durch den Orientierungsvektor imple-

mentiert. Doch das Potential könnte an dieser Stelle in Zukunft über eine Heuristik genutzt werden. Die Extrusionsrichtung ist durch die Definition der Reihenfolge in der Graphen-Syntax festgelegt und das Profil verläuft von Vertex ϑ_1 zu Vertex ϑ_2 . Durch den Tausch der Reihenfolge der *Vertices* in der *Edge*, wird das Profil in umgekehrter Richtung erstellt. Daraus geht hervor, dass die Profile gerichtet sind.

In Abbildung 5.5 ist die Triangulation des hohlen gerade gerichteten Profils dargestellt. Nicht-gekrümmte Strukturwände werden mit vier dreieckigen Flächen trianguliert und zu einem Profil zusammengesetzt. Bei der Verwendung von vier Dreieckflächen wird ein Geometriepunkt auf der jeweiligen Mitte der Kanten erzeugt. Diese werden als zusätzliche Anbindungspunkte für die automatisiert erzeugten Verbindungsknoten verwendet. Mit dieser Vorgehensweise sind grundsätzlich beliebige Profilquerschnitte möglich. Die Triangulation gibt die letzte Geometrie wieder und wird für den Simulationsmodellbau verwendet.

5.5 Extrusion entlang von Bahnkurven

Die Bedeutung der allgemeinen Spline-Formulierungen ist kaum abzuschätzen. Die Anwendung findet sich in CAD-Programmen, FEM-Preprozessoren oder Programmen zur graphischen bzw. geometrischen Darstellung von Freiformkurven- oder -flächen und polygoner Körper wieder. Auch zur Beschreibung von Formvariablen in der Formoptimierung von Bauteiloberflächen ist damit möglich. Die Extrusion von Profilen entlang von Bahnkurven wird durch die Verwendung von Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS) beschrieben. Eine umfangreiche Beschreibung von NURBS, Bezier-Kurven und Flächen mit vielen Beispielen, Derivaten und die im Folgenden verwendeten Funktionen befinden sich in Piegl und Tiller, 1995. Dazu wird ein kurzer Auszug als Beschreibung der verwendeten Definitionen dargelegt und nachfolgend die Verwendung der Bahnkurvenbeschreibung in der Graphenbeschreibung erläutert. Als erstes wird eine B-Spline-Basisfunktion $N_{i,p}(u)$ vom Grad p eingeführt:

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (5.5)$$

dazu:

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.6)$$

und dem Knoten-Vektor $U = \{u_0, \dots, u_m\}$, mit aufsteigenden reellen Zahlen \mathbb{R} und $u_i \leq u_{i+1}$, $i = 0, \dots, m-1$ gilt. Die abschnittsweise definierten Funktionen lassen sich so schon verwenden. Für die Definition einer B-Spline Kurve $C(u)$ vom Grad p kann folgende Gleichung verwendet werden:

$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) P_i \quad a \leq u \leq b \quad (5.7)$$

Dabei sind P_i die Kontrollpunkte, zusammen mit den B-Spline Basisfunktionen $N_{i,p}(u)$, sowie einem nicht periodischen (und *nonuniformen*) Knoten-Vektor U :

$$U = \{a, a, a, u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, b, b, b\} \quad (5.8)$$

Die in dieser Arbeit verwendeten NURBS-Kurven vom Grad p haben zusätzlich zu den Kontrollpunkten P_i und *nonuniformen* U noch dazugehörige Wichtungen w_i , wodurch hier $R_{i,p}(u)$ als *Rational Basis Function* eingeführt werden kann:

$$R_{i,p}(u) = \frac{N_{i,p}(u)w_i}{\sum_{j=0}^n N_{j,p}(u)w_j} \quad (5.9)$$

Schließlich kann dann mit den Kontrollpunkten zusammengefasst werden:

$$C(u) = \sum_{i=0}^n R_{i,p}(u)P_i \quad (5.10)$$

Im Optimierungsprozess der GHT3D werden die NURBS-Kurven zur Abbildung von Profilen mit gekrümmter Extrusionslinie verwendet. Die Umsetzung ist auf Raumkurven mit 3 Kontrollpunkten limitiert und wird über das Keyword *NURBS()* aktiviert. Das Keyword beinhaltet die Parameter $\langle n, x, y, pos, g \rangle$. n gibt den Grad der NURBS an, hier ist maximal 3 anwendbar. Die Position $0.0 < pos < 1.0$ gibt die Position des Hilfsknotens auf der Profilachse an und x und y die orthogonale Verschiebung. Der Punkt kann über g gewichtet werden. Die Position der Kontrollpunkte sind somit lokal entlang der Profilachse definiert. Der Modellaufbau wird durch eine Triangulation der gekrümmten Profile realisiert und ist in Abbildung 5.6 dargestellt.

Die einzelnen Querschnitte, die für die Triangulation benötigt werden, sind orthogonal zur Bahnkurve angeordnet. Diese erlauben eine gewisse Kompensation der Verzerrung durch Translation zur örtlichen Querschnittsgeometrie und schließen das Profil gerade zu einem anliegenden *Vertex* ab. In Abbildung 5.6 (a) ein Profil mittels einer Bahnkurve mit zwei Kontrollpunkten dargestellt. Bei der automatisierten Erstellung eines neuen Profils wird das bestehende Profil ε_1 aufgeteilt, um hier im Beispiel das neue Profil ε_2 (Abb. 5.6 (b)) einzuziehen. Der ursprüngliche Kurvenverlauf bleibt dabei erhalten und ist als Information zur weiteren Verarbeitung hinterlegt. Die neuen zwei Profile ε_3 und ε_4 verwenden die gleiche Kurvenbeschreibung und sind getrennt voneinander in unterschiedlichen Abschnitten trianguliert. Zusätzlich wird der winkelabhängige Abstand von den Vertices zur Geometrie berücksichtigt, beschrieben in Kapitel 5.6.1. Die Auftrennung in immer kleinere Teilsegmente wird durch die verschiedenen geometrischen Restriktionen beschränkt. Dazu zählen zum Beispiel die kleinste Profillänge oder auch ein Mindestabstand der Finite-Elemente-Kantenlänge. Die NURBS-Beschreibung kann auch in der Querschnittsbeschreibung im zweidimensionalen Graph für Profile eingesetzt werden. Abbildung 5.7 zeigt eine Auswahl von Möglichkeiten im zweidimensionalen Graph in Kombination mit NURBS. Die Anwendung wird in Beispiel 9.3 mit runden Profilen demonstriert und der Einsatz für Radien ist möglich.

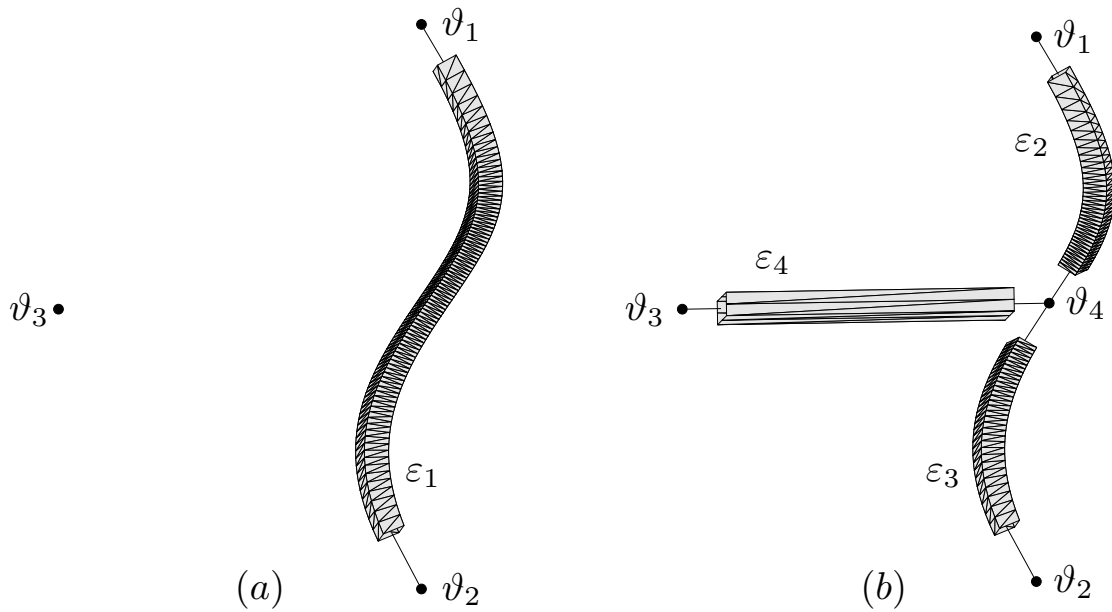


Abbildung 5.6: Profil mit NURBS-Beschreibung zwischen v_1 und v_2 (a) Auftrennen zur Erzeugung eines neuen Profils. Die ursprüngliche NURB-Kurve bleibt erhalten. Das neue Profil wird zwischen v_3 und v_4 erstellt. (b)

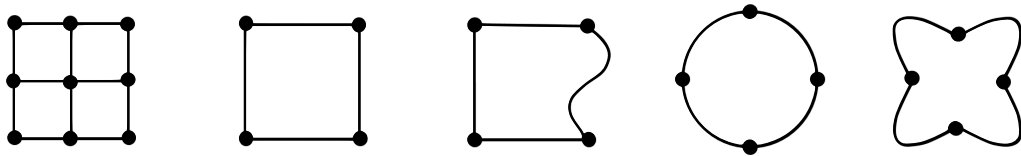


Abbildung 5.7: Möglichkeiten zur Erzeugung von 2D-Graphen mit NURBS zur Beschreibung von Geometrie im Querschnitt

5.6 Generierung von Strukturknoten

Die gestalterische Umsetzung einzelner Strukturknoten (Beyer et al., 2022) hat einen beachtlichen Einfluss auf das gesamte Strukturverhalten. Ein Strukturknoten ist in dieser Arbeit ein Verbindungselement an einer Stelle, an der mindestens zwei Profile mit einem zulaufenden Verbindungswinkel von 15° bis 180° verbunden werden sollen. Zwischen einem Verbindungswinkel von 175° bis 180° können zwei *Edges* durch eine *Edge* heuristikbasiert ersetzt werden, siehe Kapitel 7.5. Nicht nur der Strukturknoten selbst, sondern auch die Art der Verbindung zwischen den Profilen und dem Knoten müssen automatisiert erzeugt und den belastungsgerecht umgesetzt werden. Die Komplexität steigt mit steigender Anzahl an Profilen, die in einem Knoten verbunden werden sollen. Der Grad eines Verbindungsknotens wird mit der Anzahl an Profilen bemessen, die in einem Punkt zusammenführen. Zwei Ansätze zur automatisierten Erstellung von Strukturknoten sind umgesetzt und im folgenden erläutert.

5.6.1 Abstandsbestimmung zwischen Geometrie und Verbindungspunkt

Bei der automatisierten Erstellung von Strukturknoten werden möglichst gleiche Voraussetzungen an einer zu verbindenden Stelle geschaffen. Dazu lässt die Graphen-Syntax eine Definition von Abständen zwischen Geometrie und Koordinaten des Vertex zu. Um Durchdringungen zu vermeiden, dürfen die Profile nicht im Verbindungspunkt enden. In Abbildung 5.8 ist der Zustand von drei zusammenlaufenden Profilen initial dargestellt. Der erste Schritt gilt der Anpassung der Abstände l_i vom Knotenpunkt zu den einzelnen Profilen, wobei i die Laufvariable über die Profile in einem Knoten entspricht. Die Abstände l_i werden in Abhängigkeit des kleinsten vorkommenden Verbindungswinkels φ_{ij} individuell ermittelt.

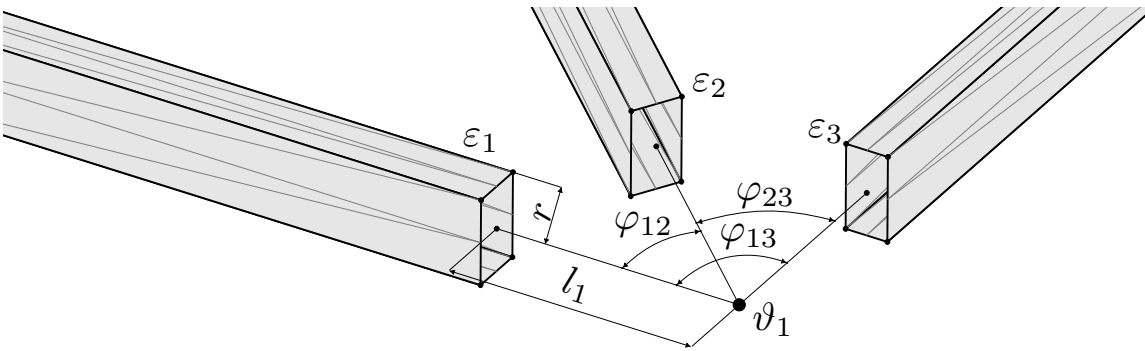


Abbildung 5.8: Darstellung von drei Profilen in einem Verbindungsknoten, l_1 ist der Abstand vom Vertex zum Profil ϵ_1 , die Verbindungswinkel sind mit φ_{ij} abgebildet, r gibt den Radius zur Umkreisung an

Das individuelle Volumen wird mit dem Radius r als Umkreisung eines jeden Profilquerschnitts berücksichtigt. Die Umkreisung soll eine Durchdringung verhindern, auch wenn zwei Profile eine um 90° quer ausgerichteten Orientierung erhalten. Durch die Berücksichtigung des individuellen Radius der Umkreisung und des kleinsten benachbarten Verbindungswinkels, resultiert für jedes Profil eine eingekürzte Länge, sodass Durchdringungen vermieden werden. Für den Zusammenhang zwischen Abstand l_i und Verbindungswinkel φ_{ij} wird ein logarithmischer Ansatz gewählt und über obere und untere Verbindungswinkel begrenzt. Die untere Grenze für die Längenabstände wird mit dem Einfluss der Umkreisung mit $l_{min} = 2r$ definiert, dieser Wert tritt bei einem Verbindungswinkel $\geq 90^\circ$ auf. Die obere Grenze ergibt sich aus der vorliegenden geometrischen Position von zwei Profilen bei einem Verbindungswinkel von 15° , der zugleich auch der minimal auftretende Verbindungswinkel ist und wird mit $l_{max} = 1.1r \cdot (\tan(15^\circ/2))^{-1}$ beschrieben. Der Verlauf folgt dann einer logarithmischen Funktion $l_i = A - B \cdot \log(\varphi_{ij})$ und ist in Abbildung 5.9 geplottet. Über die Randbedingungen l_{min} und l_{max} können die Koeffizienten A und B über ein Gleichungssystem ermittelt werden. Dieser Zusammenhang ist demnach nicht über den Grad des Verbindungsknoten oder der Größe der zusammenlaufenden Profile limitiert. Die Längen können mit diesem Ansatz für beliebig skalierte Geometriegrößen automatisiert für die Rückführung aus dem Graphen angepasst werden. Der logarithmische Verlauf sorgt bei Verbindungswinkeln zwischen 15° und 90° für engeres Anliegen am Verbindungsknoten. Weiterhin sorgt die Implementierung

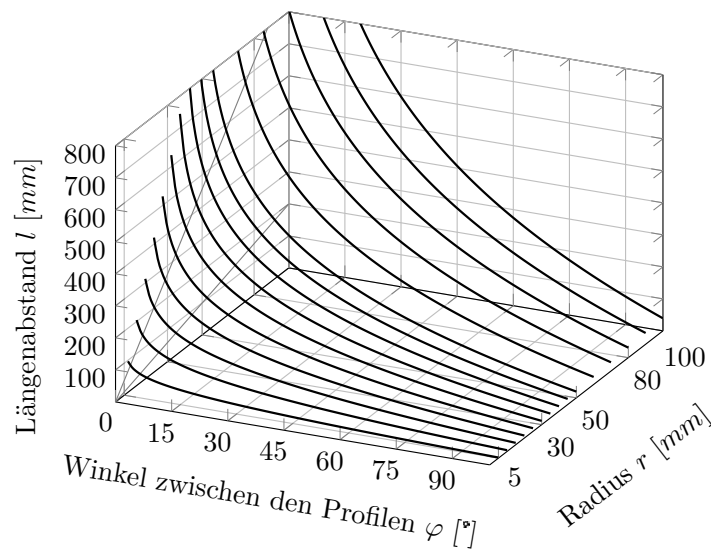


Abbildung 5.9: Beliebige skalierbare Abstandsdefinition in Abhängigkeit des minimal anliegenden Verbindungswinkels und der Umkreisung zwischen einem Radius von 0 bis 100mm

dieses Ansatzes bei jedem Verbindungsknoten für gleiche Voraussetzungen in Bezug auf den Abstand. Die Anpassung der Länge ist bei jeder topologischen Manipulation des Graphen durch die Heuristiken aktiv.

5.6.2 Starre Verbindungsknoten

In der ersten Generation der Verbindungen innerhalb der GHT3D (siehe Schumacher und Beyer, 2020 und Beyer et al., 2021) wurden starre Elemente für die automatisierte Rückführung der Geometrie aus dem Graphen im Optimierungsprozess eingesetzt. In Struktursimulationen mit expliziter Zeitintegration für Crashverhalten ist der Einsatz von starren eindimensionalen Elementen als Vereinfachung zwar möglich, sollte aber vermieden werden. Die Elemente werden „RBEs“ (*Rigid-Body-Elements*) genannt und können zur Abbildung von Verbindungs- oder Fügetechnik verwendet werden. Damit wird eine direkte starre Beziehung zwischen zwei Finite-Elemente Knoten gesetzt. Der Vorteil liegt in der Einfachheit und der stark reduzierten benötigten Datenverarbeitungsleistung. Jede detaillierte Modellierung benötigt auch längere Berechnungszeit aufgrund der Verwendung von beispielsweise höherwertigeren eindimensionalen Balkenelementen mit hinterlegtem Materialverhalten. Die Balkenelemente können zwar abschnittsweise eine genauere Verhaltenssimulation abbilden, doch für hochgradig nichtlineare Simulationen können keine adäquaten Verhaltensweisen ermittelt werden. Als Beispiel sei hier axiales *Crushing* bei Hohlstrukturen genannt, welche einen beachtlichen Mechanismus zur Energieabsorption darstellen kann. Hinzu kommt, dass sich durch die direkte Verbindung mit starren Elementen keine Deformationen in den Verbindungsknoten abbilden lässt und die angrenzenden Profile versteift werden. Die quasi tangential Zwangsbedingung lässt die Verbindungswinkel auch bei Deformation unverän-

dert und leitet künstliche Belastungen in die Strukturelemente ein. Die 1D-Elemente führen bei Optimierungszielen, wie „minimiere die Intrusion“, zu sehr guten Optimierungsergebnissen, welche aber darin begründet sind, dass alleine durch die Steigerung in der Anzahl an starren Verbindungsknoten eine stetig steigende Versteifung eintritt, ohne dass dabei mechanisch sinnvolle Strukturen herauskommen müssen. Bei Betrachtung von Beschleunigungen oder Kontaktkräften ist der Deformationsweg ein wichtiges Kriterium bei der Auslegung. Der Deformationsweg als Variable hat einen direkten Einfluss auf das optimale Kraftniveau für eine ideale Energieabsorption. Daraus folgt, dass möglichst wenig Bauraum für ein bestimmtes Lastniveau zur Energieabsorption aufgewendet werden sollte. Der Einsatz von starren Elementen erschwert das Optimierungsverfahren, denn bei jedem neu erzeugten Strukturelement reduziert sich der nutzbare Deformationsweg direkt. Daher ist eine Steigerung des Detailgrads zwingend erforderlich. Im Folgenden wird ein Ansatz zur automatisierten Erzeugung von Verbindungsknoten für Rahmenstrukturen als Erweiterung vorgestellt, bei dem Finite-Schalenelemente zur Abbildung eingesetzt werden.

5.7 Generierung nachgiebiger Verbindungsknoten

Um für verschiedene Konstellationen der Profile nachgiebige Verbindungen zu erstellen, wird der geometrische Ansatz so gewählt, dass er alle sich ergebenden Situationen abdeckt. Jegliche Reduzierung, auf beispielsweise eindimensionale Verbindungen als Abbildung für einen komplexen Sachverhalt, lassen demnach auch den Schluss von einer Reduktion der Eigenschaftengüte zu. Deshalb wird ein geometrischer Aufbau gezeigt, der mit höherwertigeren Schalen-Elementen abbildbar ist.

Im Folgenden wird eine Strategie zur automatisierten Generierung von Verbindungsknoten für beliebige Endstände von Profilen im Raum als mögliche Alternative dargestellt, wobei eine beliebige rotatorische Position der Profilachse vorliegen kann. Die Abstände zwischen den Vertices zusammen mit der Größe der Profilquerschnitte, sowie die geometrischen Restriktionen haben einen Einfluss auf die Situation der Strukturknoten. Die Eigenschaft einer adäquaten Nachgiebigkeit und Deformationsfähigkeit der Verbindungsknoten für die Finite-Elemente Simulationen ist unabdingbar und deswegen sollten möglichst Schalen-Elemente verwendet werden.

Durch die Darstellungen im Bericht *Kraftflussoptimierte Verbindungen im Ingenieurbau* der Hochschulen Trier und Mainz (Weber et al., 2016) angestoßen worden. Hier sind für Gussknoten von Balkenkonstruktionen parametrisierte Modelle mit Abwicklungen der Oberfläche der zu gießenden Form gezeigt. Dabei sind die Oberflächen grob trianguliert, damit vermutlich eine einfachere Abwicklung der Oberfläche erfolgen kann. Daraus ist die Idee entstanden, einen Grundkörper in den Bereich der zu verbindenden Profile zu legen und an den jeweiligen Seiten miteinander zu verbinden. Der Grundkörper selbst soll trianguliert werden und entsprechend sollen triangulierte Übergänge zu den Profilen geschaffen werden. Die Verbindungen werden in diesem Ansatz als Hohlstruktur ausgeführt. In Abbildung 5.10 ist die Ausgangssituation von zwei zu erzeugenden Verbindungsknoten einer Struktur gezeigt.

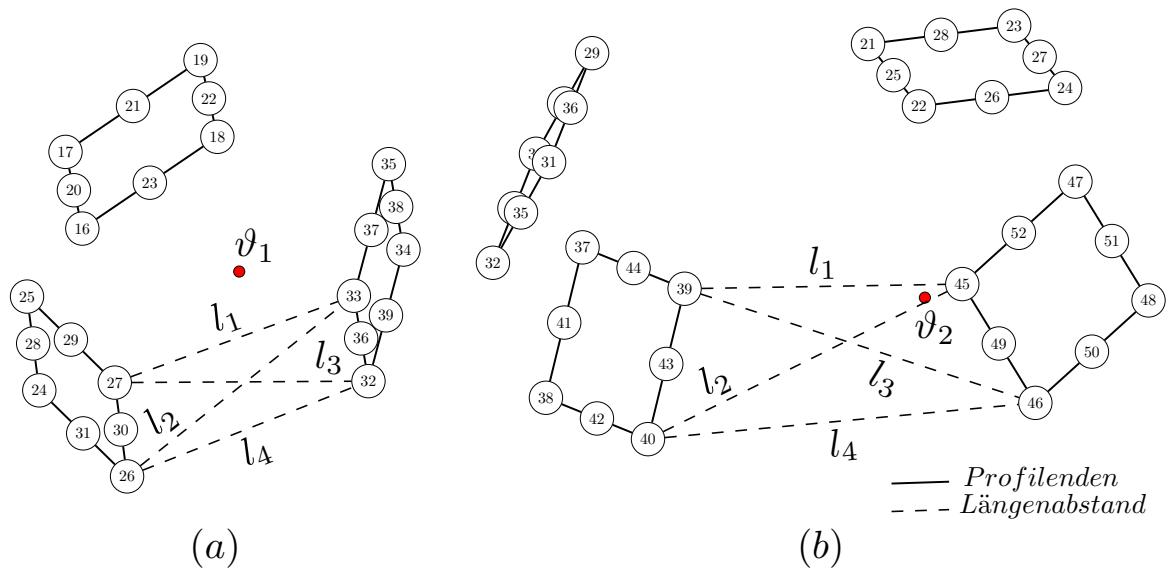


Abbildung 5.10: Zeigt die zusammenlaufenden Querschnitte der Profilenden als Ausgangssituation. Der *Vertex* v_1 ist vom Grad 3 (a) und v_2 vom Grad 4 (b)

Zwar existieren stets Anforderungen an die Steifigkeit der Strukturknoten, doch bei crashbelasteten Strukturen steht die Anforderung der Energieaufnahme durch beispielsweise Falten und Beulen im Vordergrund. Die Hohlstrukturen in dünnwandiger Ausführung sollen möglichst viel Deformation begünstigen, die Struktursteifigkeit könnte durch die Variation der Wandstärken sinnvoll kompensiert bzw. beeinflusst werden. Die erste Verbindungsstelle zeigt drei zusammenlaufende Querschnitte von verschiedenen Profilen (a) und die zweite Situation eine Verbindungsstelle mit vier verschiedenen Profilen (b). Dabei handelt es sich um die Endstände, also die äußere Umrandung von Profilen in einem Verbindungspunkt. Aufgrund der hierarchischen Graphenstruktur liegen die Informationen zur Lage der *Vertices* der dreidimensionalen Graphen und die einzelnen Eckpunkte der Profilquerschnitte in quadratischer Ausführung als *Vertices* der zweidimensionalen Graphen vor. Der Verbindungsknoten vom Grad 3 besteht aus einer festen Anzahl von 65 Punkten, die benötigt werden, um das Prisma zu erzeugen. Bei den Knoten vom Grad 4, ist eine Anzahl von 86 Punkten für das Cuboid nötig. Die Anzahl der Punkte ergibt sich aus der geometrischen Strategie und für verschiedene Knoten vom gleichen Grad jeweils gleich. Die Reihenfolge der Eckpunkte, die im 2D-Graph den Querschnitt des Profils beschreiben, ist dabei ungeordnet. Für die Bestimmung der Eckpunkte werden maximale und minimale Abstände zwischen Koordinaten im individuellen zweidimensionalen Querschnitt ermittelt und können mit einem Offset versehen werden. Im ersten Schritt werden die paarweise festen Zuordnungen von benachbarten Profilen bestimmt. Die paarweise Zuordnung sorgt für eine Reihenfolge und für Nachbarschaftsinformationen. Jedes Profil darf somit genau an zwei Paaren beteiligt sein. Die Bewertung erfolgt über eine gemittelte Abstandsrechnung über vier Längen und wird mit $(\sum_{i \in n} l_i)/n$ ermittelt. Als Ergebnis werden innerhalb der zu verbindenden Stelle die Punkte 1 bis 6 beim Grad 3 (5.11 (a))

und die Punkte 1 bis 8 beim Grad 4 (Abb. 5.11 (b)) als gewichtete Mittelpunkte zwischen den Seitenkanten der Profile erzeugt. Die ermittelten Punkte können zu einem Grundkörper zusammengeschlossen werden und es ergibt sich ein verzerrtes Prisma sowie ein verzerrter Cuboid (Abb. 5.12). Die Punkte der Grundkörper liegen mit fester Position und der paarweisen Zuordnung zu den Profilen vor. Der Grundkörper ergibt sich somit aus der vorgegebenen Situation heraus und lässt eine gewisse Flexibilität bei der Verbindung der Profile zu.

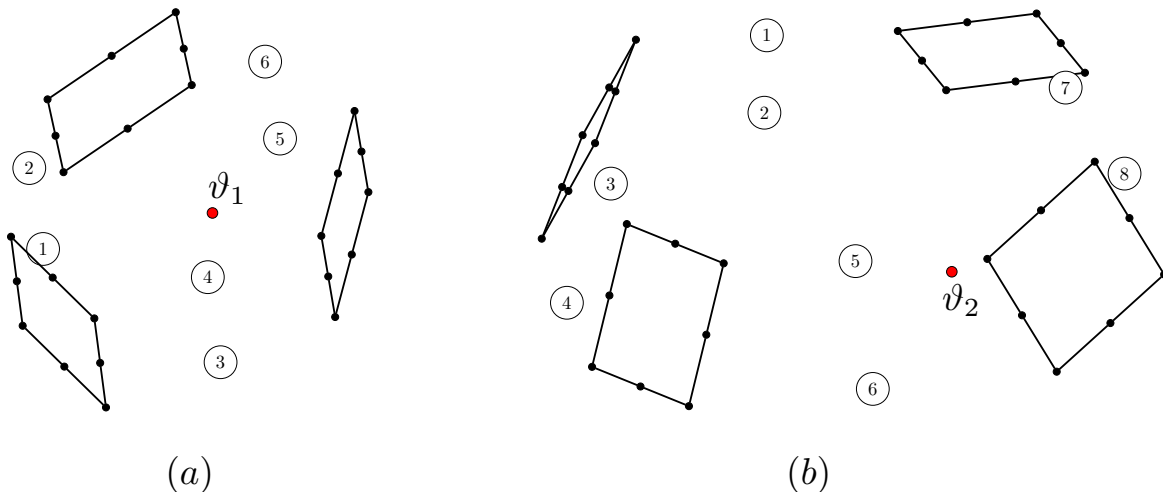


Abbildung 5.11: Die Punkte 1 – 6 bilden die paarweise gebildeten Mittelpunkte zwischen den zu verbindenden Seiten für den Grad 3 (a), die Punkte 1 – 8 bilden die Mittelpunkte beim Verbindungsknoten vom Grad 4 (b)

Die ermittelten Punkte können zu einem Grundkörper zusammengeschlossen werden und es ergibt sich ein verzerrtes Prisma sowie ein verzerrter Cuboid (Abb. 5.12). Die Punkte der Grundkörper liegen mit fester Position und der paarweisen Zuordnung zu den Profilen vor. Der Grundkörper ergibt sich somit aus der vorgegebenen Situation heraus und lässt eine gewisse Flexibilität bei der Verbindung der Profile zu. Für die eindeutige Zuordnung können je vier zu verbindende Punkte über Koordinatentransformation auf eine Ebene gebracht werden, indem die Achsen der Profile kollinear verlaufen. Jede Grundlinie erhält einen Mittelpunkt. Die rechteckigen Flächen werden alle diagonal geteilt. Der Grundkörper ist in diesem Stadium stark polygonartig, mit groben Übergängen. Über die Bauteilmaße des Bauraums wird eine Korrektur vorgenommen. Hier im Beispiel werden die Grundflächen der Grundkörper kleiner skaliert, dies schafft einen besseren Übergang und lässt die Verbindungsknoten weniger generisch aussehen (Abb. 5.13 (a)). Die Skalierung ist abhängig von der Größe des Verbindungsknoten und wird mit 10% des umlaufenden maximalen Radius, den die Profile um den Vertex aufspannen, verrechnet. Um die Form des Strukturknotens besser an die Situation anzupassen, können die Koordinaten der 16 Punkte des Grundkörpers verschoben werden und die Komplexität kann durch Kopplung der Punkte zueinander reduziert werden.

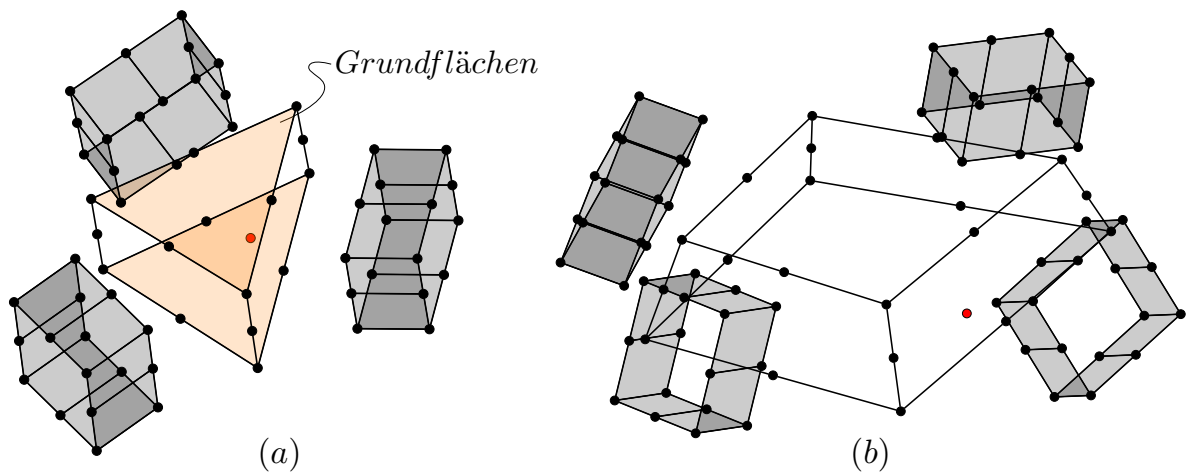


Abbildung 5.12: Verzerrtes Prisma (a) Verzerrter Cuboid (b)

Für die Anpassung der Grundkörpergeometrie an die Proportionen des Verbindungsknotens vom Grad 4 wird ein triaxiales Ellipsoid als Hilfsgeometrie definiert (Abb. 5.13 (b)). Diese geometrische Grundform wird häufig als Modellbeschreibung in der Geodäsie verwendet. Der Vorteil für diese Geometriefindung liegt in der erheblichen Reduktion der Parameter zur Bestimmung der Bauteilmaße. Die Definition von drei Längen in Richtung der drei Grundachsen ist ausreichend. Bei gleichen Längen ist im Lösungsraum eine Kugel enthalten. Das Ellipsoid wird so positioniert, dass sich jede Umrandung der einzelnen Profile im Inneren befindet und eine der Achsen des Grundkörpers koaxial (hier e_2) mit einer der Achsen des Ellipsoiden verläuft. Das bildet die Proportionen des Verbindungsknotenbauraums grob ab.

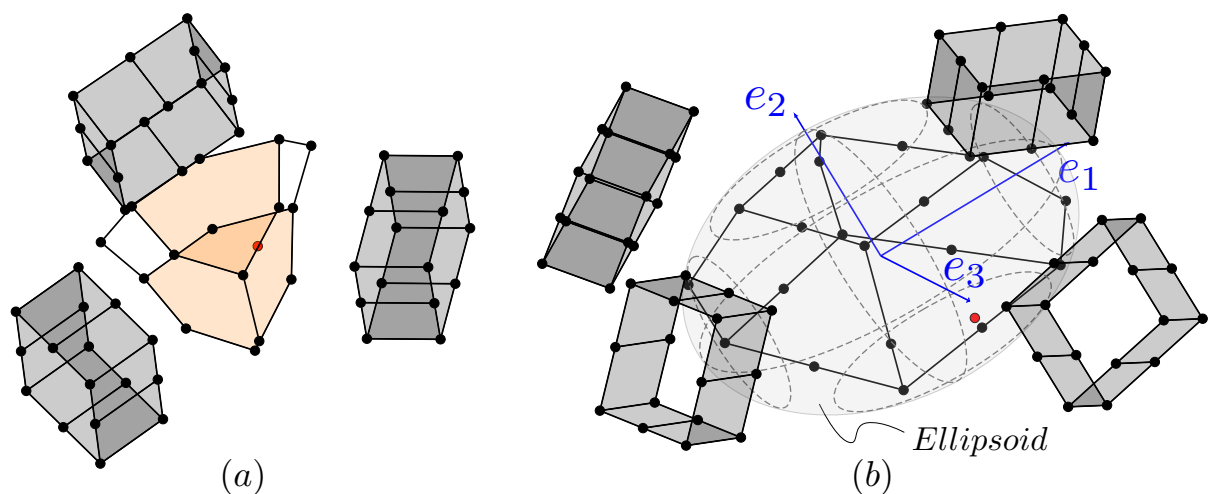


Abbildung 5.13: Skalierung der Grundflächen des Grundkörpers (a) und Anpassung durch das Ellipsoid - als Manipulation der Form (b)

Die Grundflächen des Grundkörpers werden in Ebenen-Richtung mit $1/40$ der gesamten Oberfläche des Ellipsoids skaliert. Im Anschluss wird das Ellipsoid kleiner skaliert, sodass sich alle Punkte des Grundkörpers innerhalb des Ellipsoid befinden und lediglich ein letzter Punkt an der Oberfläche vorhanden ist. Zudem lässt sich die Höhe und Breite des Grundkörpers entsprechend der Verhältnisse des Bauraums anpassen. Die Grundflächen des Grundkörpers werden in Richtung Oberfläche des Ellipsoids verschoben. Im Ergebnis ist der Grundkörper an die Bauraummaße angenähert. Die Hilfsgeometrie wird danach nicht mehr benötigt und die Profilhülsen werden mit dem Grundkörper verbunden. Dazu werden noch Mittelpunkte zwischen den Eckpunkten der Grundkörper erzeugt, wobei die einzelnen Flächen so aufgeteilt werden, dass geschlossene Streckenzüge entstehen, bestehend aus je drei Punkten. Ist die Geometrie verbunden, können die einzelnen Punkte noch im Anschluss verschoben oder durch Projektion auf Ebenen manipuliert werden. Entlang der Profilhülsen werden Ebenen aufgespannt, um mittels LGS-Löser die Projektion von beispielsweise Punkten des Grundkörpers an die geometrischen Bauraumgrenzen des Verbindungsknotens durchführen zu können. Die Profilhülsen sind der überlappende Teil, in den die einzelnen Profile gesteckt werden können (Abb. 5.14, grau dargestellt). Das *Offset* für die Überdeckung berücksichtigt die jeweils zugewiesenen Wandstärken jeder *Edge*. Die Länge der Überlappung muss zu Beginn festgelegt werden. Als Alternative können die Profile direkt mit den Strukturknoten verbunden werden.

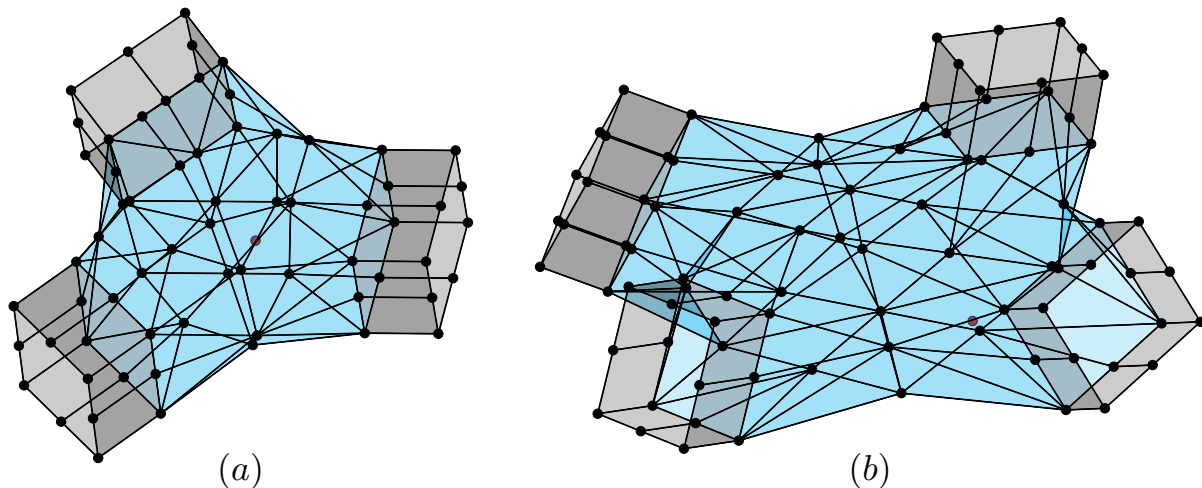


Abbildung 5.14: Triangulierte Verbindungsknoten vom Grad 3 (a) und triangulierter Verbindungsknoten vom Grad 4 (b)

Die Verbindungsknoten stellen einen ersten Schritt in die automatisierte Erstellung von Knoten im GHT3D-Prozess dar. Die Vor- und Nachteile einer solchen Verbindung liegen für diese Generation von Verbindungsknoten in der hohen Flexibilität. Nachteilig ist in diesem Zusammenhang, dass die Verbindungsknoten keinen mechanisch begünstigten oder konstruktiv sinnvollen Einflüssen unterliegen. Verbindungsknoten, die für eine Situation konstruiert sind

und mechanisch gute Kraftflüsse berücksichtigen, sind dabei im Vorteil. Die Komplexität steigt mit tieferen Detailgrad stetig an, sodass der Automatisierungsanspruch steigt. Mit den Verbindungsknoten sollen verschiedene Situationen für den iterativen Ablauf geschaffen werden, bei dem eine Automatisierung mit zeitlicher Effizienz gefordert ist. Die Konstellation von Profilen im Raum, unter Einbezug einer möglichen Rotation der Profilachse, bei nicht runden Profilen ist nahezu beliebig vielseitig. Eine weitere Anforderung an die Verbindungsknoten sind verschiedene Verbindungswinkel, mit denen die Profile verbunden werden sollen, denn die Vorschläge aus der heuristischen Bewertung sollen möglichst ausgeschöpft werden. Die Übergänge zwischen den Anbindungswinkeln φ_{ij} sind dabei fließend. Ein kritischer Punkt stellt die Fertigbarkeit der hohl ausgeführten Verbindungsknoten dar. Zur Fertigung von Verbindungsknoten vom Grad 3 könnte beispielsweise Innenhochdruckumformen eine Möglichkeit bieten. Eine weitere Möglichkeit besteht ggf. die Aufteilung von bestimmten Verbindungsknoten in zwei Tiefziehbauteile, um diese dann miteinander mittels Punktschweißen zu verbinden. Für Strukturen auf dem Meso¹-Level könnten bei direkter Verbindung der Profile auch SLM²-Verfahren eingesetzt werden. Zu möglichen Fertigungsverfahren müssen weitere Untersuchungen erfolgen. Die Herstelltechnik sollte in Zukunft in die Struktursimulation mit einbezogen werden, denn jede Geometrieänderung und Verbindungsmodellierung besitzt Einfluss auf das Strukturverhalten (siehe Kapitel 4.4.4).

In den folgenden Tabelle (5.4, 5.5 und 5.6) ist eine Auswahl an Verbindungsknoten dargestellt, wie sie in der Entwurfserstellung auftreten können. Darunter werden verschiedene Varianten der Verbindungsmodellierung zwischen den Profilen und Verbindungsknoten aufgezeigt. Zu den bestehenden Möglichkeiten gehören, dass die Profile in den Verbindungsknoten versenkt werden oder andersherum, die Verbindungsknoten werden in den Profilen versenkt. Die letzte Möglichkeit stellt eine modellierte direkte Verbundung zwischen Profil und Verbindungsknoten dar, die auch bei quadratischen oder rechteckigen Profilquerschnitten möglich ist.

Die Verbindungsknoten für einen Eckknoten werden eine gesonderte Betrachtung unterzogen, damit sich die Eckknoten besser an die Gestalt von Vierkantprofilen anpassen. Hier ist die Skalierung der Grundflächen mit 75% deutlich höher.

Für die Finite-Elemente Simulation lässt sich dem Flächenmodell eine Wandstärke zuweisen, die dann den Finite-Schalen-Elementen zugewiesen wird. Für Massenskalierungen oder Zielfunktionen, wie „Minimiere die Masse“, lässt sich die Masse durch die Summe der Volumina der einzelnen Dreiecke mit zugewiesener Wandstärke ermitteln. Die Masse der Verbindungsknoten kann dann durch die Skalierung der Wandstärken geändert und zwischen den zuvor festgelegten maximalen und minimalen Wandstärkenrestriktionen manipuliert werden.

¹Ebene zwischen Mikro und Makro

²Selective Laser Melting - Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall

Tabelle 5.4: Auswahl und Darstellung einzelner Verbindungsknoten, die Profile sind mit einem *Offset* in den Verbindungsknoten versenkt

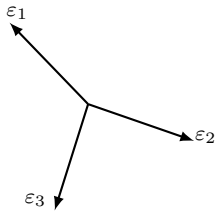
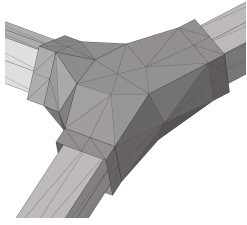
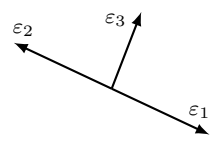
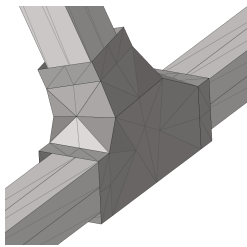
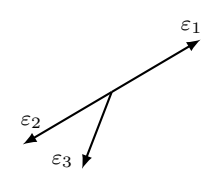
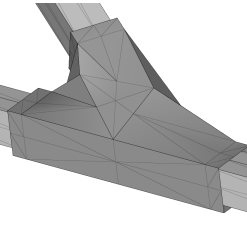
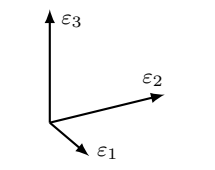
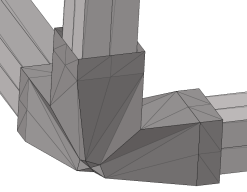
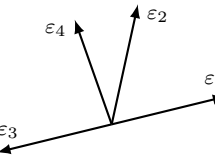
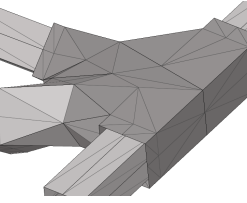
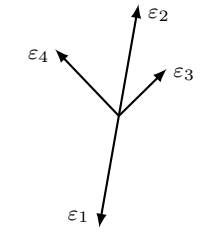
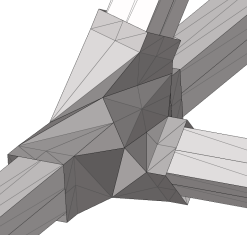
Vektordarstellung	Verbindungswinkel	Darstellung Verbindungsknoten
	$\varphi_1 = 150.07^\circ$ $\varphi_2 = 90.40^\circ$ $\varphi_3 = 119.32^\circ$	
	$\varphi_1 = 180.00^\circ$ $\varphi_2 = 99.23^\circ$ $\varphi_3 = 80.76^\circ$	
	$\varphi_1 = 180.00^\circ$ $\varphi_2 = 33.92^\circ$ $\varphi_3 = 146.07^\circ$	
	$\varphi_1 = 90.00^\circ$ $\varphi_2 = 90.00^\circ$ $\varphi_3 = 90.00^\circ$	
	$\varphi_1 = 74.02^\circ$ $\varphi_2 = 105.97^\circ$ $\varphi_3 = 74.02^\circ$ $\varphi_4 = 105.97^\circ$ $\varphi_5 = 180.00^\circ$ $\varphi_6 = 31.94^\circ$	
	$\varphi_1 = 180.00^\circ$ $\varphi_2 = 45.09^\circ$ $\varphi_3 = 60.11^\circ$ $\varphi_4 = 134.90^\circ$ $\varphi_5 = 134.90^\circ$ $\varphi_6 = 45.09^\circ$	

Tabelle 5.5: Auswahl und Darstellung einzelner Verbindungsknoten, die Verbindungsknoten sind mit einem *Offset* in den Profilen versenkt

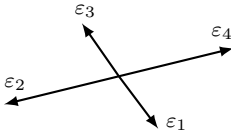
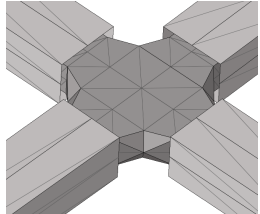
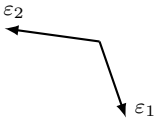
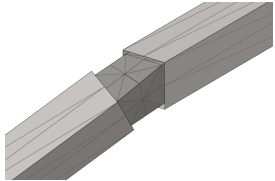
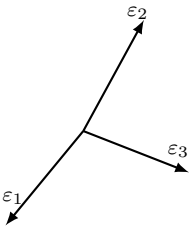
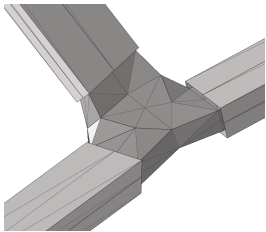
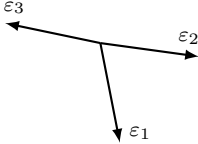
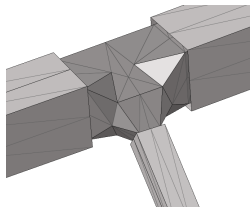
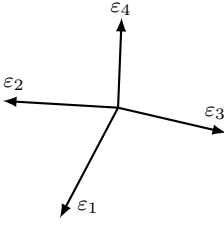
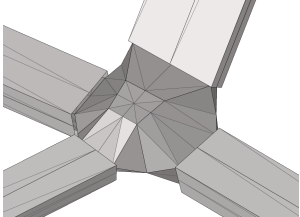
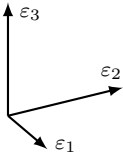
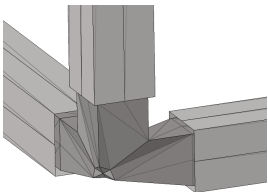
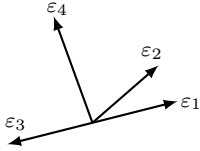
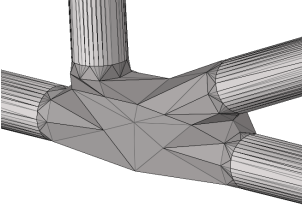
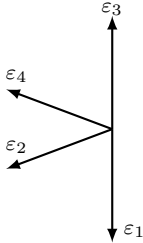
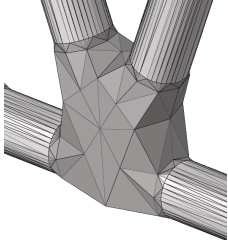
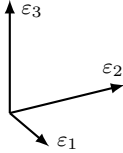
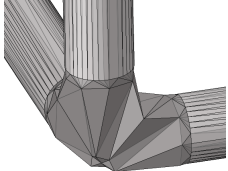
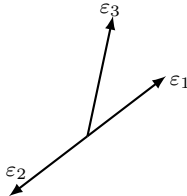
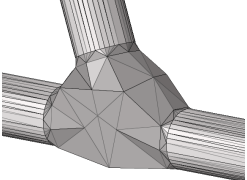
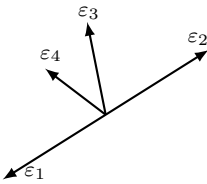
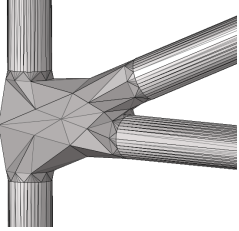
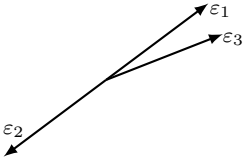
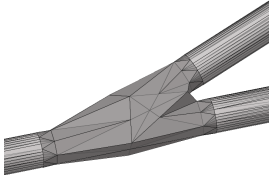
Vektordarstellung	Verbindungswinkel	Darstellung Verbindungsknoten
	$\varphi_1 = 90.27^\circ$ $\varphi_2 = 90.91^\circ$ $\varphi_3 = 89.08^\circ$ $\varphi_4 = 89.72^\circ$ $\varphi_5 = 178.81^\circ$ $\varphi_6 = 180.00^\circ$	
	$\varphi_1 = 136.95^\circ$	
	$\varphi_1 = 151.70^\circ$ $\varphi_2 = 86.19^\circ$ $\varphi_3 = 100.29^\circ$	
	$\varphi_1 = 87.63^\circ$ $\varphi_2 = 176.58^\circ$ $\varphi_3 = 93.97^\circ$	
	$\varphi_1 = 75.64^\circ$ $\varphi_2 = 170.41^\circ$ $\varphi_3 = 90.16^\circ$ $\varphi_4 = 120.63^\circ$ $\varphi_5 = 94.82^\circ$ $\varphi_6 = 93.80^\circ$	
	$\varphi_1 = 90.00^\circ$ $\varphi_2 = 90.00^\circ$ $\varphi_3 = 90.00^\circ$	

Tabelle 5.6: Auswahl und Darstellung einzelner Verbindungsknoten, die runde Profile sind mit den Verbindungsknoten direkt verbunden.

Vektordarstellung	Verbindungswinkel	Darstellung Verbindungsknoten
	$\varphi_1 = 20.60^\circ$ $\varphi_2 = 159.39^\circ$ $\varphi_3 = 90.00^\circ$ $\varphi_4 = 90.00^\circ$ $\varphi_5 = 180.00^\circ$ $\varphi_6 = 69.39^\circ$	
	$\varphi_1 = 69.39^\circ$ $\varphi_2 = 110.60^\circ$ $\varphi_3 = 69.39^\circ$ $\varphi_4 = 110.60^\circ$ $\varphi_5 = 180.00^\circ$ $\varphi_6 = 41.20^\circ$	
	$\varphi_1 = 90^\circ$ $\varphi_2 = 90^\circ$ $\varphi_3 = 90^\circ$	
	$\varphi_1 = 180.00^\circ$ $\varphi_2 = 118.87^\circ$ $\varphi_3 = 61.12^\circ$	
	$\varphi_1 = 180.00^\circ$ $\varphi_2 = 66.77^\circ$ $\varphi_3 = 29.56^\circ$ $\varphi_4 = 90.00^\circ$ $\varphi_5 = 113.22^\circ$ $\varphi_6 = 90.00^\circ$	
	$\varphi_1 = 180.00^\circ$ $\varphi_2 = 159.02^\circ$ $\varphi_3 = 20.97^\circ$	

5.8 Erzeugung eines rechenfähigen Modells

Die Geometrierzeugung geschieht vollständig aus der Graphenebene heraus. Die einzelnen Profile und Verbindungsknoten werden als triangulierte Strukturen automatisiert herausgeschrieben und können über ein externes Vernetzungsprogramm in ein Berechnungsmodell überführt werden. Als Schnittstelle wird das Format *.STL* gewählt, welches ASCII basiert ist. Die Auflistung 5.1 zeigt die zusammenhängende Graphen-Syntax.

Auflistung 5.1: 3D-Graphenbeschreibung für eine zylinderförmige Rahmenstruktur

```

1 GRAPH;1; TYPE(3DGRID); NAME(zylinder_3D); SOURCE(profilegraph)
2 VERTEX;3; TYPE(LINK); COORDINATES(36.0,36.0,-70.0); THICKNESS(1.0)
3 VERTEX;7; TYPE(LINK); COORDINATES(36.0,36.0,70.0); THICKNESS(1.0)
4 VERTEX;4; TYPE(LINK); COORDINATES(36.0,-36.0,-70.0); THICKNESS(1.0)
5 VERTEX;6; TYPE(LINK); COORDINATES(36.0,-36.0,70.0); THICKNESS(1.0)
6 VERTEX;1; TYPE(LINK); COORDINATES(-36.0,36.0,-70.0); THICKNESS(1.0)
7 VERTEX;2; TYPE(LINK); COORDINATES(-36.0,36.0,70.0); THICKNESS(1.0)
8 VERTEX;5; TYPE(LINK); COORDINATES(-36.0,-36.0,-70.0); THICKNESS(1.0)
9 VERTEX;8; TYPE(LINK); COORDINATES(-36.0,-36.0,70.0); THICKNESS(1.0)
10 EDGE;1; VERTICES(1,2); TYPE(ExtrudedProfile,cec1); LENGTH(10.18,10.18);
    ORIENTATIONVECTOR(-1.0,1.0,0.0)
11 EDGE;2; VERTICES(5,8); TYPE(ExtrudedProfile,cec1); LENGTH(10.18,10.18);
    ORIENTATIONVECTOR(-1.0,-1.0,0.0)
12 EDGE;3; VERTICES(1,5); TYPE(ExtrudedProfile,cec1); LENGTH(10.18,10.18);
    ORIENTATIONVECTOR(1.0,0.0,0.0); NURBS(2,0,-1,0.33,2,0,-1,0.66,2)
13 EDGE;4; VERTICES(8,2); TYPE(ExtrudedProfile,cec1); LENGTH(10.18,10.18);
    ORIENTATIONVECTOR(-1.0,0.0,0.0); NURBS(2,0,1,0.33,2,0,1,0.66,2)
14 EDGE;5; VERTICES(4,6); TYPE(ExtrudedProfile,cec1); LENGTH(10.18,10.18);
    ORIENTATIONVECTOR(1.0,-1.0,0.0)
15 EDGE;6; VERTICES(1,3); TYPE(ExtrudedProfile,cec1); LENGTH(10.18,10.18);
    ORIENTATIONVECTOR(0.0,-1.0,0.0); NURBS(2,0,-1,0.33,2,0,-1,0.66,2)
16 EDGE;7; VERTICES(3,4); TYPE(ExtrudedProfile,cec1); LENGTH(10.18,10.18);
    ORIENTATIONVECTOR(-1.0,0.0,0.0); NURBS(2,0,-1,0.33,2,0,-1,0.66,2)
17 EDGE;8; VERTICES(7,2); TYPE(ExtrudedProfile,cec1); LENGTH(10.18,10.182)
    ; ORIENTATIONVECTOR(0.0,1.0,0.0); NURBS(2,0,1,0.33,2,0,1,0.66,2)
18 EDGE;9; VERTICES(5,4); TYPE(ExtrudedProfile,cec1); LENGTH(10.18,10.18);
    ORIENTATIONVECTOR(0.0,1.0,0.0); NURBS(2,0,-1,0.33,2,0,-1,0.66,2)
19 EDGE;10; VERTICES(3,7); TYPE(ExtrudedProfile,cec1); LENGTH(10.18,10.18)
    ; ORIENTATIONVECTOR(1.0,1.0,0.0)
20 EDGE;11; VERTICES(6,8); TYPE(ExtrudedProfile,cec1); LENGTH(10.18,10.18)
    ; ORIENTATIONVECTOR(0.0,-1.0,0.0); NURBS(2,0,1,0.33,2,0,1,0.66,2)
21 EDGE;12; VERTICES(6,7); TYPE(ExtrudedProfile,cec1); LENGTH(10.18,10.18)
    ; ORIENTATIONVECTOR(1.0,0.0,0.0); NURBS(2,0,1,0.33,2,0,1,0.66,2)

```

Innerhalb des *Keywords Type* eines Profils ist mit dem Namen *cec1* auf den dazugehörigen 2D-Graphen zur geometrischen Beschreibung des Querschnitts verwiesen. In Abbildung 5.15 ist die zur Auflistung 4.1 zugehörige Geometrie dargestellt. Die Graphenstruktur gibt auf

einer abstrahierten Ebene vor, wie die Profile angeordnet sind (Abb. 5.15(a)). Für den Aufbau werden quadratische Profilquerschnitte hinterlegt, der zweidimensionale Graph ist in der Auflistung 5.2 dargestellt.

Auflistung 5.2: 2D-Graphenbeschreibung zur geometrischen Bestimmung des Querschnitts

```

1 GRAPH; 1; TYPE(2DEXTRUSION); NAME(cec1)
2 VERTEX;1; TYPE(LINK); COORDINATES(-3.0,-3.0,0.0); THICKNESS(0.0)
3 VERTEX;2; TYPE(LINK); COORDINATES(3.0,-3.0,0.0); THICKNESS(0.0)
4 VERTEX;3; TYPE(LINK); COORDINATES(3.0,3.0,0.0); THICKNESS(0.0)
5 VERTEX;4; TYPE(LINK); COORDINATES(-3.0,3.0,0.0); THICKNESS(0.0)
6 EDGE;1; VERTICES(1,2); TYPE(ExtrudedWall); LENGTH(-0.0,-1.0); NURBS(0);
  MATERIAL(1001); THICKNESS(1.0); FIX(false)
7 EDGE;2; VERTICES(2,3); TYPE(ExtrudedWall); LENGTH(-0.0,-1.0); NURBS(0);
  MATERIAL(1001); THICKNESS(1.0); FIX(false)
8 EDGE;3; VERTICES(3,4); TYPE(ExtrudedWall); LENGTH(-0.0,-1.0); NURBS(0);
  MATERIAL(1001); THICKNESS(1.0)
9 EDGE;4; VERTICES(4,1); TYPE(ExtrudedWall); LENGTH(-0.0,-1.0); NURBS(0);
  MATERIAL(1001); THICKNESS(1.0);

```

Die triangulierte Struktur erlaubt über Aufsummieren der einzelnen Dreiecksflächen mit der zugeordneten Wandstärke ein Volumen zu bestimmen. Außerdem ermöglicht diese Geometrie eine zusätzliche Überprüfung komplexer Räume auf Durchdringungen (siehe nachfolgendes Kapitel 5.9). Weiterhin lässt die Vorgehensweise den Einsatz verschiedener Ver-

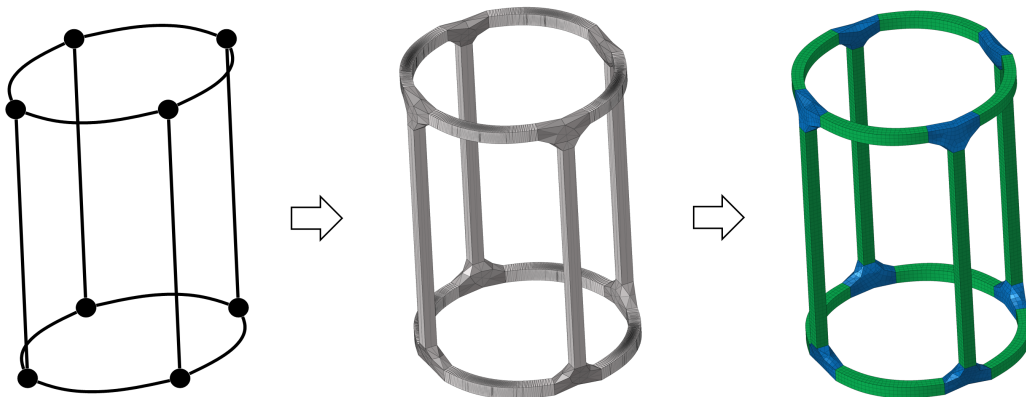


Abbildung 5.15: Geometrie auf der Graphenebene (links), erzeugte triangulierte Struktur (mitte) und Finite-Elemente Modell erzeugt mit einem externen Vernetzer (rechts)

netzungsprogrammen zu. Im vorgestellten Ablauf, wird die triangulierte Struktur mittels STL-Schnittstelle zu HyperMesh³ per TCI-Skript eingeladen, vernetzt und exportiert.

³Altair Engineering Inc.

5.9 Durchdringungsprüfung von Geometrie im Optimierungsprozess

Im Folgenden wird das Verfahren zur Prüfung von Durchdringungen der Geometrie im dreidimensionalen Raum vorgestellt. Ziel ist die Vermeidung von sich durchdringender Geometrie vor dem Start der Simulationen. Bei der Erstellung von neuen Strukturelementen ist eine Prüfung auf Durchdringung der individuellen Geometrie zwingend erforderlich. Im automatisierten Prozess wird aus der geometrischen Ableitung des Graphen direkt ein Simulationsmodell erstellt und dabei können Durchdringungen zu Fehlern führen.

Dreieck zu Dreieck Durchdringungsprüfung

Im Kern basiert die Prüfung der Geometrie auf der schnellen Dreieck zu Dreieck Durchdringungsprüfung von Möller, 1997 in abgewandelter Form, dabei werden die Intervalle der Schnittlinien zweier Dreiecke betrachtet. Eine Durchdringung ist dann erfüllt, wenn die Schnittlinie zweier Dreiecke überlappen. Liegt keine Überlappung vor, schneiden sich die entsprechenden Dreiecke nicht. Eine Effizienzsteigerung für solche Algorithmen basiert meistens auf der Vermeidung von Rechenzeit. Die Wahl auf eine dreiecksbasierte Prüfung liegt zum einen daran, dass sich eine Triangulierung beliebiger Geometrien über herkömmliche Diskretisierungsalgorithmen (beispielsweise für FEM) ausreichend genau abbilden lassen und zum andern auch CAD-basierte Geometriedaten über das Format STL (StereoLithographie) als Datenschnittstelle mit einbezogen werden können. Außerdem wird für eine weitere Zeitersparnis auf eine äußere Prüfung von quaderförmigen, kartesisch ausgerichteten Volumina zurückgegriffen.

Zwei Dreiecke sind mit T_1 und T_2 definiert, wobei die Eckpunkte mit je V_0^1, V_1^1, V_2^1 und V_0^2, V_1^2, V_2^2 bezeichnet sind. Des Weiteren werden die zwei Ebenengleichungen mit $\pi_1 = N_1 \cdot X + d_1$ und $\pi_2 = N_2 \cdot X + d_2$ angegeben und X ist ein beliebiger Punkt auf den Ebenen, wobei der Normalenvektor $N_2 = (V_1^2 - V_3^2) \times (V_1^2 - V_2^2)$ und $d_2 = -N_2 \cdot V_0^2$ sind. Zunächst werden die Abstände der Punkte zur anderen Ebene ermittelt:

$$d_{V_i^1} = N_2 \cdot V_i^1 + d_2, \quad i \in 0, 1, 2 \quad (5.11)$$

Denn, wenn hier $d_{V_i^1} \neq 0$ sind und es liegt überall das gleiche Vorzeichen vor, dann existiert keine Schnittlinie der zwei Ebenen. Dabei gilt dann die Aussage, dass T_1 auf einer Seite der Ebene π_2 liegt und eine Überlappung ist ausgeschlossen. Gleiches wird dann für T_2 und π_1 geprüft. Diese Überprüfung wird zu Beginn ausgeführt, um bei Erfüllung weitere Rechenressourcen zu sparen. Werden die Bedingungen nun erfüllt, dann existiert eine Linie in Richtung $N_1 \times N_2$. Außerdem lässt sich bei $d_{V_i^1} = 0$ der dritte Fall ausfindig machen, hier sind die Dreiecke komplanar. Falls nun die Schnittlinie $L = O + tD$ mit Richtung $D = N_1 \times N_2$ mit einem beliebigen Punkt O existiert, liegen beide Dreiecke auf dieser Linie und nun muss geprüft werden, ob sich die Intervalle ebenfalls überlappen. Mit Intervall sei hier der Teil

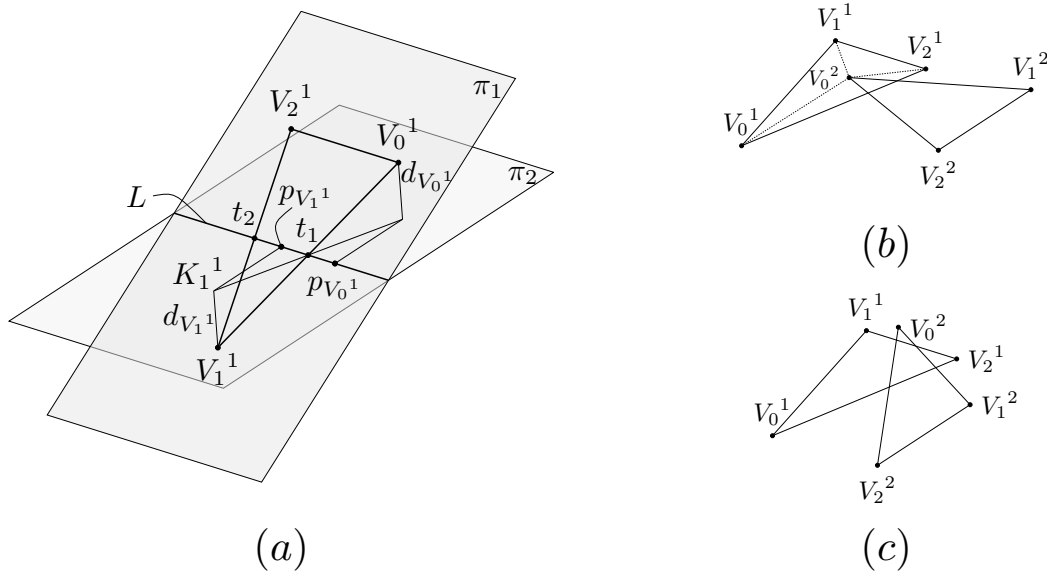


Abbildung 5.16: Zustand zur Intervallbestimmung bei Durchdringung zweier Dreiecke, skizziert nach Möller, 1997 (a) Zustand einer Punkt in Dreieck Strategie (2D) (b) Zustand Dreiecke liegen ineinander ohne Punkt in der Fläche (2D) (c)

eines Dreiecks gemeint, der auf der Schnittlinie liegt. Für eine erste Betrachtung liegen jetzt beispielsweise die Punkte V_0^1 und V_2^1 auf gleicher Seite von π_2 und V_1^1 auf der anderen Seite von π_2 . Jetzt wird das Intervall des Dreiecks T_1 auf der Schnittlinie L ermittelt. Dazu werden die Schnittpunkte der Strecken $\overline{V_0^1V_1^1}$ und $\overline{V_1^1V_2^1}$ auf L benötigt. Als erstes werden die Eckpunkte auf die Schnittlinie projiziert:

$$p_{V_i^1} = D \cdot (V_i^1 - O) \quad (5.12)$$

Der Zustand ist in Abbildung 5.16 (a) veranschaulicht. Der Schnittbereich ermittelt sich über $B = \overline{V_1^1V_1^1} \cap L = O + t_1D$. Über die Projektion von V_i^1 auf π_2 ergeben sich K_i^1 und somit kann über $\Delta V_0^1BK_0^1$ und $\Delta V_1^1BK_1^1$ nun je die äußeren Grenzen t_1 und t_2 der Intervalle gesucht werden:

$$t_1 = p_{V_0^1} + (p_{V_1^1} - p_{V_0^1}) \frac{d_{V_0^1}}{d_{V_0^1} - d_{V_1^1}} \quad (5.13)$$

Möller, 1997 zeigt weiterhin Strategien zur Optimierung des Ablaufs durch geometrische Projektion auf und gibt Hilfestellung zur Implementierung. Zur Abfrage bei Detektion von komplanaren Dreiecken wird an dieser Stelle auf andere Literatur verwiesen und zur Lösung, auf Methoden zurückgegriffen, bei denen die Punkte auf Koordinatenebenen projiziert werden. Außerdem wird auch auf sogenannte „Punkt in Polygon Strategien“ (siehe Haines, 1994) verwiesen. Im Folgenden wird eine zusätzlich eigene Erweiterung der Methoden beschrieben. Die Projektion kann unterschieden werden, in dem geschaut wird, auf welcher Koordinatenebene die Projektionsfläche am größten wird. Da hier ausschließlich Dreiecke betrachtet werden und sich dieser Fall der Komplanarität auf ein zweidimensionales Problem reduziert,

kann hierzu eine „Punkt in Dreieck Abfragen“ verwendet werden. Diese Aufgabe kann durch unterschiedliche Betrachtungen behandelt werden. Der Vergleich von Flächenverhältnissen oder Anordnung von Winkeln sei hierbei angemerkt. Der betrachtete Zustand ist in Abbildung 5.16 (b) dargestellt. Für den verwendeten Ansatz werden die Vektoren zwischen den Eckpunkten von T_1 mit $\bar{u}_0 = V_0^1 - V_1^1$, $\bar{u}_1 = V_1^1 - V_2^1$ und $\bar{u}_2 = V_2^1 - V_0^1$ gebildet. Im Anschluss können die Vektoren der Eckpunkte zum zu prüfenden Punkt V_0^2 von T_2 mit v_i ermittelt werden und über das Kreuzprodukt und das Bilden der Determinante $\det(u_i \times v_i)$, können folgende Gleichungen aufgestellt werden:

$$r_1 = (V_{0x}^2 - V_{0x}^1)(V_{1y}^1 - V_{0y}^1) - (V_{0y}^2 - V_{0y}^1)(V_{1x}^1 - V_{0x}^1) \quad (5.14)$$

$$r_2 = (V_{0x}^2 - V_{1x}^1)(V_{2y}^1 - V_{1y}^1) - (V_{0y}^2 - V_{1y}^1)(V_{2x}^1 - V_{1x}^1) \quad (5.15)$$

$$r_3 = (V_{0x}^2 - V_{2x}^1)(V_{0y}^1 - V_{2y}^1) - (V_{0y}^2 - V_{2y}^1)(V_{0x}^1 - V_{2x}^1) \quad (5.16)$$

Sind r_i mit $i \in 1, 2, 3$ insgesamt positiv oder negativ, dann liegt der getestete Punkt in der Fläche des Dreiecks und es besteht eine Durchdringung. Die Prüfung muss ebenfalls für die Eckpunkte V_1^2 und V_2^2 ausgeführt werden. Ein weiterer Fall stellt die Durchdringung der Dreiecke dar, wobei kein Eckpunkt des ersten Dreiecks in der Fläche des anderen Dreiecks liegt, siehe Abbildung 5.16 (c). Dieser Fall muss wieder gesondert betrachtet werden, indem der tatsächliche Schnittpunkt der Geraden betrachtet wird. Voraussetzung für diese Prüfung ist die Komplanarität zweier Dreiecke und eine Gerade, die nicht parallel ist oder sich kreuzt, wird dabei ausgeschlossen. Die Prüfung, ob ein Schnittpunkt vorhanden ist, wird über eine Testebene ermittelt. Zunächst wird der Normalenvektor N_3 mit $\overline{V_1^2 V_0^2} \times \overline{V_2^2 V_0^2}$ ermittelt, um im Anschluss mit einem weiteren Kreuzprodukt von $\overline{V_2^1 V_1^1} \times N_3$, den Normalenvektor N_4 der Testebene zu ermitteln. Wir betrachten das erste Szenario mit V_2^1 als Stützvektor der Testebene und erhalten über Einsetzen der Geradengleichung in die Testebengleichung:

$$(V_2^1 - (V_0^2 + t \cdot R_1)) \cdot N_4 = 0 \quad (5.17)$$

R_1 stellt den Richtungsvektor der Gerade $\overline{V_1^2 V_0^2}$. Zur Bewertung wird die Gleichung für den dreidimensionalen Fall nach t umgestellt:

$$t = \frac{N_{4x} \cdot (V_2^1_x - V_0^2_x) + N_{4y} \cdot (V_2^1_y - V_0^2_y) + N_{4z} \cdot (V_2^1_z - V_0^2_z)}{N_{4x} \cdot R_{1x} + N_{4y} \cdot R_{1y} + N_{4z} \cdot R_{1z}} \quad (5.18)$$

Der Parameter t ist ein Maß dafür, wie oft der Richtungsvektor R_1 in den Abstand zu Punkt V_0^2 hineinpasst. Daraus folgt, dass, falls der Parameter zwischen $0 < t < 1$ liegt, und dabei umgekehrt ebenfalls dieser Test für die zweite Strecke $\overline{V_2^1 V_1^1}$, $0 < t < 1$ gilt, dann liegen die Dreiecke ineinander. Der Test muss für alle Strecken der beiden Dreiecke ausgeführt werden, um eine Durchdringung zu ermitteln oder ausschließen zu können.

In Tabelle 5.7 Spalte 3 sind die benötigten Zeiten für einen $n \cdot m$ prozedural sequentiellen Durchlauf abgebildet. Dabei fällt auf, dass für eine höhere Anzahl von Tests, wie sie bei der

Prüfung von mehreren Körpern auftreten kann, schnell ein erhöhter Zeitbedarf erforderlich ist. Die Zeiten hängen von der programmiertechnischen Umsetzung und Schnelligkeit des verwendeten Prozessors ab. Die Tabelle soll hier eine Richtung vorgeben, um eine praktikable Lösung für den Optimierungsprozess einordnen zu können.

Quaderbasierte Durchdringungsprüfung zur Vermeidung von Rechenzeit

Eine weitere Reduzierung der Rechenzeit kann auch hier durch Vermeidung von zu prüfenden Elementen erreicht werden. Aus der Tabelle (5.7) geht hervor, dass für die Durchdringungsprüfung von kartesisch ausgerichteten quaderförmigen Volumen eine höhere Anzahl von Tests erfolgen kann, als im Vergleich zur dreiecksbasierten Prüfung. Um auf Durchdringung prüfen zu können, werden die überlappenden Intervalle auf den Koordinatenachsen mit minimalen und maximalen Dimensionen der kartesisch ausgerichteten Quader herangezogen.

Die Quader werden zur Vermeidung von dreiecksbasierter Durchdringungsprüfung eingesetzt. Zwei Quader sind mit M_1 und M_2 definiert, wobei die Quader je acht Gitterpunkte c_i^1 und c_i^2 besitzen. Die Prüfung kann wesentlich schneller erfolgen, dazu sei auf Tabelle 5.7 Spalte 4 verwiesen. Bei dünnwandigen Bauteilen beispielsweise muss die Höhe und Breite der Voxel zur Bauteilvolumenabbildung angepasst sein und dazu ist eine enorme Anzahl an Voxel nötig. Deshalb wird zwecks der Vermeidung von Rechenzeit eine Kombination der Verfahren dreiecksbasierter und quaderbasierter Durchdringungsprüfung verfolgt, indem zuerst die Komponente ihrer Dimension in Voxel aufgeteilt wird, um grobe Durchdringung zu detektieren und im Anschluss, falls nötig, eine detaillierte Prüfung auszuführen. Als erstes wird die gesamte Bauteildimension ermittelt und diese in gleichgroße Voxel aufgeteilt. Die Anzahl der Voxel lässt sich steuern und ist abhängig von der Diskretisierung der eingehenden Komponente. Die Anzahl der Voxel wird im Anschluss durch Zusammenlegen der Volumen zu größeren Quadern über die Nachbarschaft erzielt. Dazu werden die Voxel verwendet, in denen sich Bauteilgeometrie befindet. Im nächsten Schritt wird in drei Koordinatenrichtungen nacheinander ermittelt, welche Voxel zusammen vereinigt bzw. vereinfacht werden können. Für die Prüfung auf Durchdringung für $M_1 \cap M_2$ müssen folgende Fälle erfüllt werden:

$$M_1 \cap M_2 = \begin{cases} c_{xmax}^1 \geq c_{xmin}^2 \wedge c_{xmin}^1 \leq c_{xmax}^2 \\ c_{ymax}^1 \geq c_{ymin}^2 \wedge c_{ymin}^1 \leq c_{ymax}^2 \\ c_{zmin}^1 \geq c_{zmin}^2 \wedge c_{zmin}^1 \leq c_{zmax}^2 \end{cases} \quad (5.19)$$

Für die Nutzung können einzelne Dreiecke mit einem Quader umschlossen werden. Abbildung 5.17 zeigt die Aufteilung und Umschließung durch Quader. Eine detailliertere Quaderaufteilung für mehr Flexibilität ist ebenfalls möglich, siehe Anhang in Abbildung A.5. Eine weitere Reduzierung der Rechenzeit lässt sich durch eine programmiertechnische Parallelisierung von ortsfester Prüfgeometrie erzielen, siehe Tab. 5.7, Spalte 5 und 6. Bei jeder Prüfung wird zu Beginn die gesamte Bauteildimension überprüft (Abbildung 5.17 (b)), im Anschluss die Quaderdiskretisierung, um bei Erfüllung als letzten Schritt die genauere dreiecksbasierte

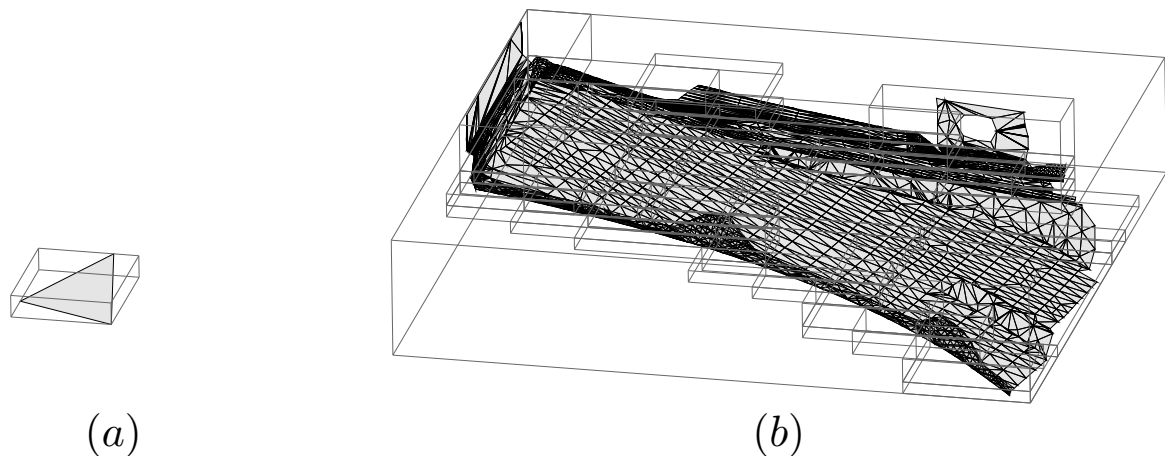


Abbildung 5.17: Zu prüfendes Dreieck (a) Zu testende Komponente (b)

Prüfung auszuführen. Trifft eine der ersten Prüfebene nicht zu, wird der Test an dieser Stelle abgebrochen. Dadurch können von der Anzahl an Prüfungen, eine für den Ablauf der GHT3D angemessene Zeit erzielt und entsprechend komplexe Bauräume einbezogen werden. Die benötigte Zeit ist im Vergleich zu den benötigten Berechnungszeiten der Simulationen realer Anwendungen und den Anwendungsbeispielen in dieser Arbeit sehr gering. Die Geometrie für die Simulationsmodelle aus dem Graphen sind durch eine einfache Triangulation abbildbar und lassen sich für Selbstdurchdringung und Durchdringungen von angrenzenden Bauteilen effizient nutzen. Angrenzende Komponente, die als Non-Design-Space gelten, müssen zu Beginn des Optimierungsprozesses mit Quadern umschlossen werden und liegen somit für beliebig viele Prüfungen auf Durchdringung vor. Außerdem liegen die zu prüfenden Geometrieabschnitte strategisch sortiert in Speicherbäumen vor, sodass die Zeiten im oberen Bereich ebenfalls variieren können. Neben CAD basierter Geometrie, lassen sich zur Durchdringungsprüfung ebenfalls LS-DYNA FE-Modelle einladen. Diese Möglichkeit lässt den Einsatz in einer Finiten-Elemente-Baugruppe zu.

Tabelle 5.7: Geschwindigkeit der Durchdringungsprüfung in Abhängigkeit der Anzahl für sequentielle und parallele || Ausführung

n	m	Dreiecke	Quader	Dreiecke	Quader
[–]	[–]	[h:min:s]	[h:min:s]	[h:min:s]	[h:min:s]
1	200000	<00:00:01	<00:00:01	<00:00:01	<00:00:01
1000	200000	00:00:32	00:00:04	00:00:14	00:00:01
10000	200000	00:05:07	00:00:45	00:02:14	00:00:12
50000	200000	00:25:19	00:03:40	00:11:19	00:01:00
100000	200000	00:50:01	00:09:20	00:22:34	00:02:01
200000	200000	01:41:15	00:19:44	00:45:10	00:04:27

6 Erweiterte Graphenfunktionen

Mit der Graphenstruktur können beliebige Punkte einfach oder mehrfach in Beziehung gesetzt werden. Prinzipiell können die von den Heuristiken generierten Entwürfe zu sehr kleinen Strukturformationen führen. In Kapitel 5.8 wird eine Möglichkeit gezeigt, wie ein Finite-Elemente Modell, das aus den Grapheninformationen heraus erzeugt wurde, aussehen kann. Durch die Verwendung von zweidimensionalen Graphen zur Querschnittsbeschreibung und den daraus resultierenden Profilen nimmt jede *Edge* ein definiertes Volumen ein. Dieses Volumen führt bei der Erstellung von dreidimensionalen Rahmenstrukturen zu geometrischen Einschränkungen. Nicht nur Durchdringungen, wie im Kapitel zuvor beschrieben, müssen detektiert werden, sondern auch geometrische Restriktionen können auf der Graphenebene definiert werden (Schumacher und Beyer, 2020 und Beyer et al., 2021).

6.1 Geometrische Restriktionen

Durch die Vielzahl von Entwürfen muss für jede Struktur eine fehlerfreie Modellierung und, falls erforderlich, zusätzliche individuelle Restriktionen berücksichtigt werden. Über diese geometrischen Einschränkungen kann Einfluss auf die Art genommen werden, wie neue Profile in den Bauraum eingezogen bzw. zugelassen werden. Die folgenden Restriktionen können berücksichtigt werden:

- Minimale und Maximale Länge einer Edge
- Minimaler Abstand zwischen Edges
- Minimaler Verbindungswinkel zwischen Edges
- Minimale und maximale Wandstärke
- Minimaler und maximaler Durchmesser
- Symmetriebedingung
- Durchdringungsprüfung: *non-design space*

Für die Länge einer *Edge*, wird über die Lage von *Vertices* eine einfache Abstandsrechnung der Strecke im kartesischen Raum ermitteln. Dazu wird jedes *Vertex*-Paar überprüft, welches zu einer *Edge* gehört. Der Abstand zwischen zwei Profilen im dreidimensionalen Raum wird auch mit einer Abstandsrechnung ermittelt. Dabei wird eine Profilachse mit mehreren Punkten approximiert, um dann entlang der Achse zwischen den Profilen zu verfahren. Zusätzlich wird der Radius der Umkreisung hinzugerechnet. Durchdringungen werden mittels komplexer Durchdringungsprüfung vermieden, siehe Kapitel 5.9. Eine weitere Restrikti-

on, die Einfluss auf die Struktur nimmt, ist die Überprüfung von Verbindungswinkeln. Der kleinste Verbindungswinkel zwischen zwei zusammenlaufenden Profilen wird über die Richtungsvektoren ermittelt, die zwischen den zugeordneten *Vertices* gebildet werden. Ist der Verbindungswinkel zwischen Profilen zu klein, können Durchdringungen kaum vermieden werden. Die Längenberechnung zur Einkürzung der Profile sorgt zusätzlich für durchdringungsfreie Geometrie, jedoch führt diese dann bei kleinen Winkeln zu sehr kurzen Profilen. Anstelle einer Wandstärkeevaluation kann auch der Profildurchmesser eindimensional variiert werden, dazu können entsprechend Grenzen gesetzt werden.

Zur Steuerung der geometrischen Lage von Profilen werden die Länge, der Abstand und der Winkel verwendet, um die geometrische Modellierung mit Grenzen zu versehen. Damit werden zu Beginn des Verfahrens grundlegende geometrische Randbedingungen festgelegt, die für alle generierten Entwürfe im Optimierungsprozess gelten.

6.2 Symmetrie des Graphen

Bei den geometrischen Restriktionen können optional Symmetriebedingungen Berücksichtigung werden. Diese Einstellung wird der Graph in seine Oktanten zerlegt und für eine symmetrische Eigenschaft wird eine Spiegelung um die Koordinatenebene durchgeführt. Die Spiegelung wird von der positiven Seite auf die negative Seite vollzogen. Im kartesischen Raum sind hier 3 Koordinatenebenen zur Spiegelung verfügbar. Auch eine Kombination aus den Ebenen kann zur Bildung von Symmetrien verwendet werden. Um die folgenden Ebenen und deren Kombination ist eine Spiegelung möglich:

- xz -Ebene
- xy -Ebene
- yz -Ebene
- xy , xz -Ebene
- xz , yz -Ebene
- xy , yz -Ebene
- xz , xy , yz -Ebene

Für die Symmetriebedingungen muss der Graph bei der Erstellung zum globalen Koordinatenursprung ausgerichtet sein, sodass die Symmetrieebenen des Graphen den Koordinatenebenen entsprechen. Im Anschluss kann das Finite Elemente Modell durch weitere Koordinatentransformationen an den Verwendungsort für die Simulation überführt werden. Die Symmetriebedingungen stellen für die hier ausgeführten Optimierungsbeispiele eine wichtige Reduktion des Designraums dar.

6.3 Dimensionierungsvariablen

Die Dimensionierungen werden eingesetzt, um Entwürfe detaillierter zu bewerten und sind fester Bestandteil des Optimierungsverfahrens. Dazu sind in der inneren Optimierungsschleife verschiedene Möglichkeiten gegeben. Wird für jede Strukturwand eine Entwurfsvariable definiert, stellt das den umfangreichsten Fall dar. Bei einer Rahmenstruktur entspricht das der Summe aus der Anzahl an Strukturwänden (ein Profil besteht aus mehreren Strukturwänden) und die Summe der Anzahl an Strukturknoten. Diese Variante führt zu einer erhöhten Anzahl an Designvariablen und sollte weiter eingeschränkt werden. Eine Reduzierung der Anzahl von Entwurfsvariablen kann durch die Zusammenführung der Entwurfsvariablen pro Profil erfolgen, bis hin zu einer Reduzierung auf einen eindimensionalen Fall, somit würde die Struktur eine einheitliche Wandstärke als Entwurfsvariable besitzen. In der Dimensionierungsoptimierung werden die verschiedenen Einstellungen zum symmetrischen Aufbau berücksichtigt, denn die Wandstärken bleiben durch die forcierte Spiegelung ebenensymmetrisch, beschränkt durch die Graphenelemente. Die Wandstärkenveränderung kann zur Massenskalierung zur Erhaltung einer Massen-Gleichheitsrestriktion genutzt werden. Dabei kann die Definition von oberen und unteren Grenzen der Wandstärke berücksichtigt werden. Ein Ziel kann auch eine Neuverteilung der Massen durch geänderte Wandstärken sein, bei der die Ausgangsmasse der Rahmenstruktur erhalten bleibt.

6.4 Formvariablen

Die Form der Rahmenstruktur hat einen enormen Einfluss auf das mechanische Strukturverhalten und kann durch Verschieben der *Vertices* zu besseren Ergebnissen führen. Die Definition der oberen und unteren Grenzen von Formvariablen gestaltet sich anspruchsvoller als die der Wandstärken. Jeder Verbindungsknoten kann mit automatisiert austarierten Entwurfsvariablen zur Beschreibung der Koordinaten im 3D-Raum versehen werden. Das Verfahren basiert auf dem in der GHT zur Optimierung von Querschnitten von Profilen und verwendet eine Art *künstliches Kristallwachstum*, Ortman, 2015. Das simulierte Wachstum wurde iterativ innerhalb des vorgegebenen zweidimensionalen Querschnittes ausgeführt, indem kleine Rechtecke stetig vergrößert werden, bis die Grenzen aneinanderstoßen. Für dreidimensionale Rahmenstrukturen werden entsprechend dreidimensionale Quader verwendet. An jedem *Vertex* wird ein Quader gesetzt, welcher dann über mehrere Iterationen vergrößert wird, bis Grenzen aneinanderstoßen. Treffen einzelne Grenzen der Quader aufeinander, wird das Wachstum in diese Richtung deaktiviert. Außerdem wird die Restriktion der minimalen *Edge*-Länge berücksichtigt und die betroffene Quaderseite entgegengesetzt reduziert. Das Wachstum kann durch die äußere Graphen-Dimension begrenzt werden. In Abbildung 6.1 (oben) ist eine einfache würfelartige Struktur abgebildet. Die grauen Bereiche, in denen sich dann die jeweiligen Eckknoten befinden, stellen die automatisierten Entwurfsräume dar. Jedem Vertex werden damit 3 Entwurfsvariablen zur Beschreibung der Lage innerhalb des Graphen eingeräumt. Insgesamt hat das Beispiel 24 Entwurfsvariablen.

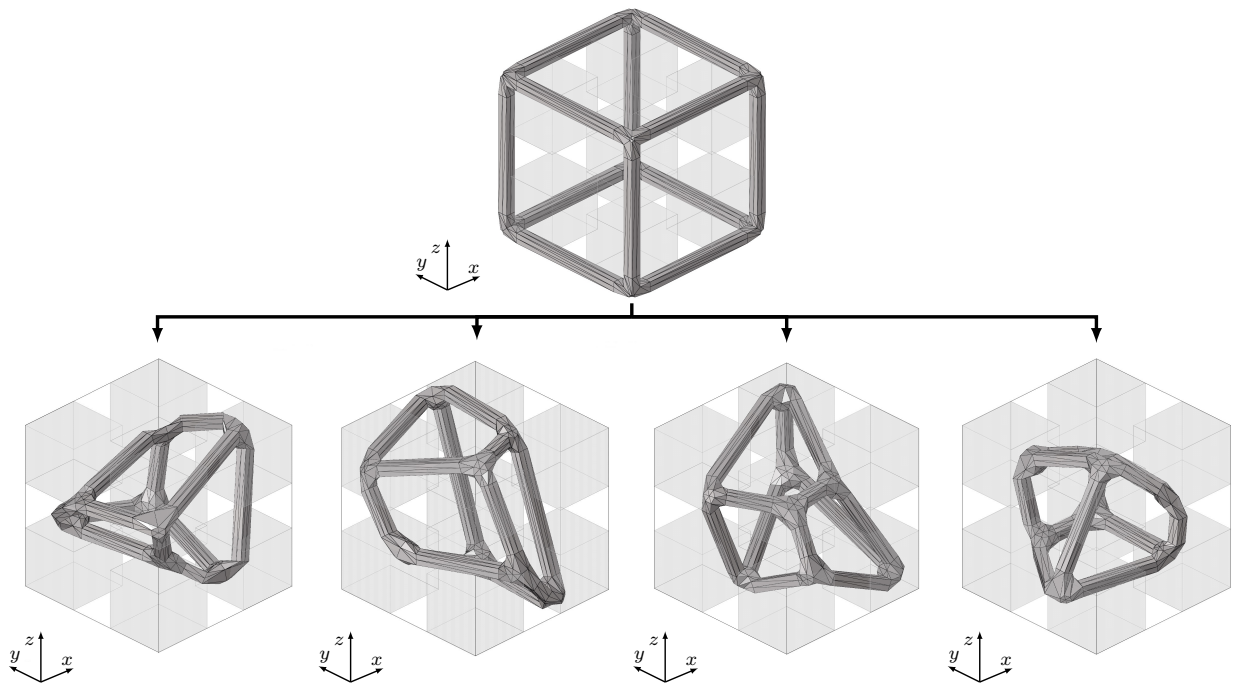


Abbildung 6.1: Formvariablen - Ausgangsgeometrie (oben) Vier Entwürfe aus DoE Sample (unten)

Das Wachstum an sich reicht zur Einhaltung aller geometrischen Restriktionen nicht aus. In diesem ersten Schritt wird das vorhandene Volumen zunächst aufgeteilt. Damit die Einhaltung der geometrischen Restriktionen für alle Entwürfe gewährleistet ist, findet nach dem Wachstum in einem zweiten Schritt eine Prüfung der expliziten Formgrenzen statt. Durch die Verschiebung eines Verbindungsknotens, an dem mehrere Profile zusammenlaufen, kann es durch die Verschränkung im dreidimensionalen Raum zu Durchdringungen mit anderen Profilen kommen. Um dies zu vermeiden, wird ein Vertex in die erste Ecke des zugewiesenen Quaders verschoben. Im Anschluss fahren die verbleibenden Vertices die acht Ecken ihrer zugewiesenen Quader ab und nach jeder Änderung wird der Entwurf auf die Einhaltung der geometrischen Restriktionen intern geprüft. Falls die eingestellten Restriktionen verletzt werden, findet eine Einschränkung der Entwurfsraumgrenzen entgegen der aktuellen Wachstumsrichtung statt. Durch die kombinierte Prüfung wird die Einhaltung der geometrischen Restriktionen gewährleistet. Die Reduktion der Entwurfsvariablen kann so lange ausgeführt werden, bis einzelne Entwurfsvariablen deaktiviert werden. Grundsätzlich können alle drei Raumrichtungen im Ergebnis deaktiviert werden, sodass die ursprüngliche Variante (Ursprung des Quaders) erreicht wird, denn diese Position hält als Voraussetzung alle Restriktionen ein. Tritt der Fall auf, dass eine Dimension des Entwurfsraums pro *Vertex* unter 1% der nominalen Länge der längsten Graphen-Dimension fällt, wird diese Richtung deaktiviert. Kleine mögliche Toleranzen führen zu nicht nennenswerten Änderungen im Optimierungsprozess und können ausgespart werden. In Abbildung 6.1 (unten) sind vier Varianten aus einer *DoE* mit insgesamt 30 Stützstellen zu sehen. Mit diesem Auszug wird ersichtlich, dass eine hohe Anzahl von Stützstellen nötig ist, um diesen Entwurfsraum adäquat abzubilden.

Der überwiegende Teil der Entwürfe stellt für praktische Anwendungen eher unbrauchbare Entwürfe dar. Für die strategische Optimierung ist es sinnvoll, die Entwurfsvariablen gezielt einzuschränken. Grundsätzlich können dafür in Kombination Symmetriebedingungen (Kapitel 6.2) eingesetzt werden. Abbildung 6.2 zeigt die Kombination der Formvariablen mit dreifacher Symmetrie.

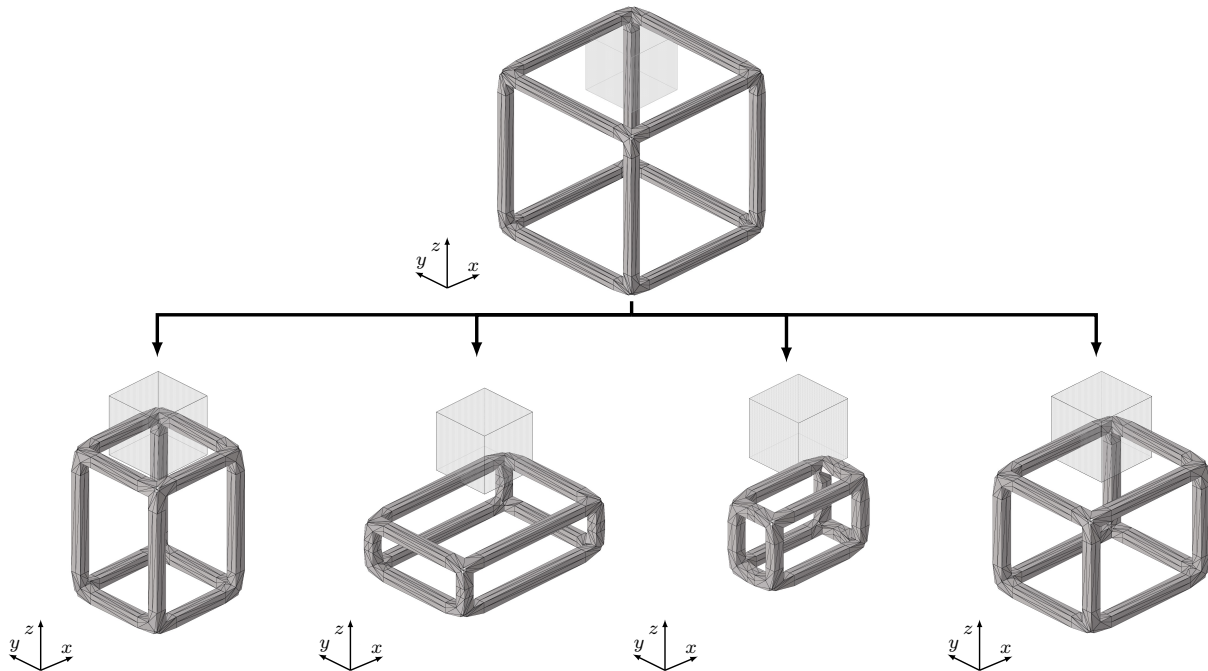


Abbildung 6.2: Formvariablen, symmetrisch - Ausgangsgeometrie (oben) Vier Entwürfe aus DoE Sample (unten)

In Abbildung 6.2 (oben) ist am initialen Modell ersichtlich, dass lediglich ein Vertex im positiven Bereich des Koordinatensystems mit Formvariablen belegt wird. Durch Symmetriebedingungen kann der Entwurfsraum aus Anwendersicht technisch sinnvoll eingeschränkt werden (Abb. 6.2, unten). Die Anzahl der Entwurfsvariablen reduziert sich dadurch auf drei. Die geschickte Reduzierung von Entwurfsvariablen ist für die verwendeten Simulationsmodelle ressourcenbedingt unabdingbar. Wenn ein Entwurf aus höherer Iteration des GHT3D-Verfahrens verwendet werden würde, dann können ohne jegliche Einschränkung 100 oder mehr Entwurfsvariablen entstehen.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion der Anzahl der Formvariablen ist die Deaktivierung von einzelnen Richtungen mit Non-Design-Räume als Schnittmenge. Diese Volumina stellen kartesische Quader dar, die an eine definierte Position erzeugt werden können. Befinden sich einzelne *Vertices* in diesen Volumen, werden die Entwurfsvariablen in einzelne Richtungen verkleinert. Als Resultat können so einzelne Raumrichtungen verkürzt oder gar deaktiviert werden. Besonders, wenn die Deformationslänge eine wichtige Größe für den Optimierungsprozess darstellt, ist das Deaktivieren der Möglichkeit von kleiner werdenden Entwürfen hilfreich. Der längst mögliche Deformationsweg sollte grundlegend für das niedrigste Kraftniveau sorgen. Die gewählte Kombination von Symmetrie und Schnittvolumen

ist vom Lastfall bzw. Ziel abhängig. Zusätzlich können auch komplexere triangulierte Non-Design-Räume erzeugt werden, die als Einschränkung berücksichtigt werden können. Mit dem Keyword *FIX* können *Vertices* von einer Koordinatenänderung ausgenommen werden.

6.5 Skalierung des Querschnitts

Zusätzlich zu den Form- und Wandstärkenvariablen kann der Durchmesser der Profilquerschnitte als Entwurfsvariablen definiert werden. Diese Erweiterung eignet sich als Entwurfsvariable in der inneren Optimierungsschleife für Strukturen auf der Meso-Ebene. Diese Ebene stellt den Bereich der Strukturgröße dar, in dem der Einfluss einer Wandstärkenänderung in dieser Arbeit schwindet. Die Besonderheit dieser Umsetzung besteht in der Kopplung von Durchmesser und dreidimensionaler Graphengröße. Falls bei einem Entwurf der Durchmesser des Querschnitts über eine DoE sinkt, dann wird zur vollen Bauraumausnutzung der übergeordnete 3D Graph größer skaliert. So wird stets das volle Bauraumvolumen genutzt. Für die automatisierte Abtastung der oberen und unteren Grenzen des Durchmessers wird die untere Grenze mit d_{dyn} [%] als Abweichung fixiert. Grundsätzlich ist das Kleiner-Skalieren aus geometrische Sicht immer möglich. Eingeschränkt wird die Skalierung mittels festgelegter unterer Grenze von beispielsweise einem Durchmesser von $1mm$. Die obere Grenze wird iterativ größer skaliert und je Schritt auf geometrische Restriktionen geprüft, bis nicht mehr größer skaliert werden kann. Die Variation des Durchmessers aus einer Ausgangsgeometrie ist in Abbildung 6.3 (oben) dargestellt. Der Durchmesser der Profile wird hier eindimensional variiert (unten), die dreidimensionale Graphengröße zur Bauraumnutzung wird weiterhin vollständig genutzt.

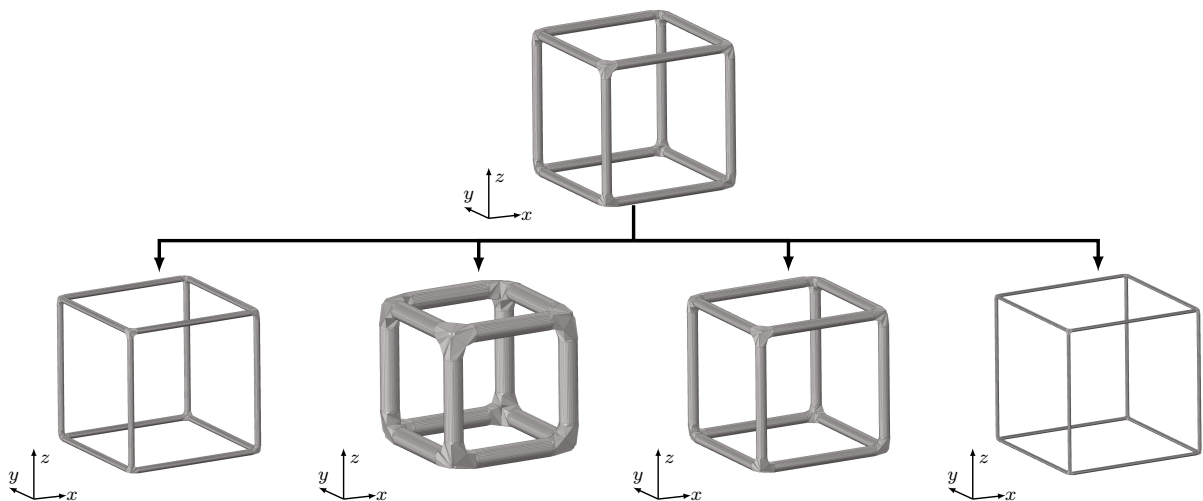


Abbildung 6.3: Ausgangsgeometrie (oben), vier Entwürfe aus DoE Sample (unten)

7 Heuristiken zur Optimierung crashbelasteter Rahmenstrukturen

Eine Heuristik ist ein regelbasierter Ablauf, der mit wenig Informationen effizient zu einer passenden Lösung oder zumindest zu einer Verbesserung für ein Problem führen kann. In diesem Kapitel werden eine Reihe von Heuristiken vorgestellt, die für Vorschläge zur mechanisch sinnvollen topologischen Änderung zum Einsatz kommen. Die Heuristiken für die dreidimensionale Rahmenstruktur basieren auf den Heuristiken, die in der GHT, Ortmann und Schumacher, 2013 zur Optimierung von crashbelasteten Profilquerschnitten implementiert wurden. Für die dreidimensionale Rahmenoptimierung wurde ein Teil des Wissens extrahiert, Schumacher und Beyer, 2020, Beyer et al., 2021.

Prinzipiell werden Vorschläge zur topologischen Änderung auf Basis von Simulationsdaten und der individuellen Strategie einer Heuristik generiert. Für die Auswertung werden Geschwindigkeiten und Verschiebungen von Finite Elemente Knoten sowie die innere Energie der Finite Elemente verwendet. In dem hier vorgestellten Prozess besteht keine Abhängigkeit von Heuristiken zu vordefinierten Zielfunktionen eines Optimierungsproblems. Um möglichst viele Situationen abzudecken, die sich innerhalb einer crashbelasteten Struktur ereignen können, agieren manche Heuristiken sehr unterschiedlich. Jeder Vorschlag hat zum Ziel, die mechanischen Eigenschaften einer Struktur zu verbessern. Dies geschieht in einem konkurrierenden Prozess. An dieser Stelle sei auf Kapitel 8 verwiesen, in dem der Optimierungsablauf erläutert wird.

In einem Crashszenario wird die in einem System eingebrachte kinetische Energie im Idealfall durch kontrollierte Deformation absorbiert. Die Absorption kann beispielsweise durch Falten und Beulen erfolgen. Die Heuristiken verfolgen den Ansatz, verschiedene Phänomene in einer Crashsimulation zu bewerten und sollen basierend darauf Maßnahmen zur Verbesserung einleiten. Zu den Phänomenen zählt beispielsweise eine schnelle Deformation, die aufgrund von Stabilitätsverlust eintreten kann. Eine hohe innere Energie ist ein Indiz für plastische Deformation und kann je nach Situation als kritische Stelle identifiziert werden. Auch werden Zug- und Druckräume betrachtet. Die Leistungsfähigkeit des gesamten Verfahrens ist abhängig von der Anzahl der Heuristiken. Je mehr mechanische Phänomene betrachtet werden, desto besser können individuelle Entwürfe für verschiedene Problemstellen erzeugt werden. Mit einer steigenden Anzahl von Heuristiken steigt die Anzahl von Vorschlägen gleichermaßen.

Im Folgenden werden die einzelnen Heuristiken erläutert und aufgezeigt, welche Daten für die topologische Manipulation auf der Graphenebene ausgewertet werden.

7.1 Abstützen schnell deformierender Edges

Innerhalb der crashbelasteten Rahmenstrukturen neigen die eingesetzten Profile durch auftretende axiale Belastungen zum Ausknicken. Aufgrund des Stabilitätsverlustes können Impaktoren unter Umständen mit großen Distanzen und wenig Widerstand in die Struktur eindringen. Um die Stabilität zu verbessern, sollen weitere Strukturelemente die Bereiche stützen und in die Deformation mit einbezogen werden. Profile mit Stabilitätsverlust weisen oft im Vergleich zu anderen Bereichen hohe laterale Geschwindigkeiten auf. Aufgrund der hier verwendeten Rahmenstruktur tritt das Phänomen Knicken besonders häufig auf.

Grundlegend erfolgt die Bewertung auf die gleiche Weise, wie in der Heuristik Abstützen schnell deformierender Wände, nach Ortmann und Schumacher, 2013. Hier wird ein Deformationsindex zur Einschätzung gebildet, wie schnell sich die Deformation einer einzelnen Wand ereignet. Die Auswertung geschieht auf einer reduzierten Ebene. Dazu wird eine Analyseebene mittels Knotenreihen innerhalb der beteiligten Strukturwände auf Einschlagshöhe abstrahiert bzw. reduziert. Im Anschluss wird pro Linienzug ein Index zur Einordnung in Bezug zur schnellen Deformation pro Strukturwand erzeugt. Abbildung 7.1 zeigt den grundlegenden Mechanismus.

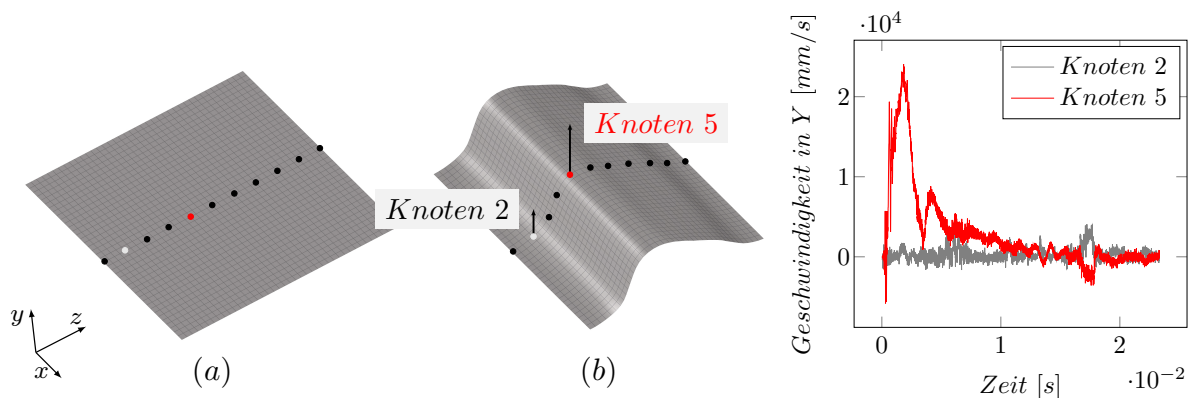


Abbildung 7.1: Ausgangszustand eines Blechs vor Belastung (a), Schnelle Deformation unter Last, ggf. Stabilitätsverlust (b) und Geschwindigkeitsunterschied zweier FE-Knoten (rechts), nach Ortmann, 2015

Bei Stabilitätsverlust durch Beulen oder Knicken einer Strukturwand entstehen im zeitlichen Verlauf temporär hohe Geschwindigkeiten an den Finite-Elemente Knoten. Durch den direkten Vergleich mit benachbarten Knoten in einer Reihe können so die hohen Differenzen

zur Bewertung herangezogen werden. Knoten 5 hat bei $t = 0.025s$ im Vergleich zu Knoten 2 eine erheblich höhere Geschwindigkeit. In der Variante liegt die Reihe der Knoten in Belastungsrichtung und der Effekt wird im hohen Maße abgebildet. Diese Linienauswertung wird auf die dreidimensionalen Rahmenstrukturen übertragen. Die Abbildung 7.2 zeigt einen schematischen Ablauf, wie ein Profil aufgrund dieser schnellen Deformation gestützt werden soll. Dazu wird ein zusätzliches Strukturelement in die Rahmenstruktur eingefügt. Zur Auswertung von Knick- und Biegebewegung einzelner Streben, wird wie in Abbildung 7.1 gezeigt, eine Reihe von Knoten entlang der Profilachse gelegt und so die Vorgehensweise übertragen.

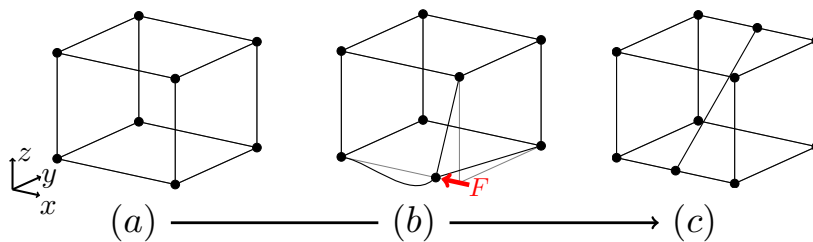


Abbildung 7.2: Schematische Darstellung *Abstützen schnell deformierender Edges*: Ausgangsgeometrie (a), Schnelle Deformation unter Last (b) und neue Struktur mit unterstützender *Edge* (c)

Um die schnelle Deformation zu erkennen, wird ein Profil abschnittsweise aufgeteilt und für jeden Abschnitt ein gewichteter Mittelpunkt ermittelt. Eine Charakteristik für diesen Stabilitätsverlust stellen hohe Deformationsgeschwindigkeiten in orthogonaler Richtung zur Profilachse dar. Abbildung 7.3 zeigt die Auswertung zwischen den Zeitpunkten t_0 und t_1 an den Mittelpunkten einer einzelnen *Edge*. Dazu werden die Koordinaten x, y, z der Finite Elemente in ein lokales Koordinatensystem ζ, ξ, η transformiert. Die Profilachse richtet sich dabei nach η aus. Zur Auswertung werden Geschwindigkeiten in lateraler Richtung in der $\zeta\xi$ -Ebene zu jedem Zeitpunkt betrachtet.

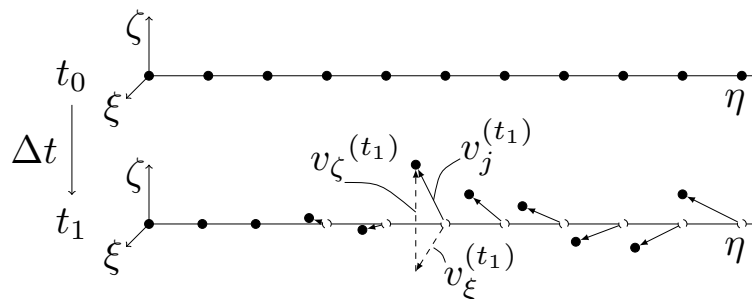


Abbildung 7.3: Auswertung für schnelle Deformation in lateraler Richtung

Die Geschwindigkeitsvektoren in axialer Richtung bleiben unberücksichtigt. Die Geschwindigkeiten in lateraler Richtung werden über alle Zeitpunkte $T = \{t_0, t_1, \dots, t_{n_t}\}$ hinweg in das lokale Koordinatensystem transformiert. Die Menge $I = \{i_1, i_2, \dots, i_{n_i}\}$ beinhaltet alle dreidimensionalen *Edges*, weiterhin sind $J = \{j_1, j_2, \dots, j_m\}$ die geometrischen Mittelpunkte für eine *Edge* i und N_{f_e} stellt die Anzahl der Finite Elemente Knoten dar. $\vec{p}_j^{(t)}$ beschreibt

den Ort eines Mittelpunkts auf der Profalachse. Zur Bewertung wird ein Deformationsindex α_i für jede *Edge* i berechnet, nach Ortmann und Schumacher, 2014:

$$\alpha_i = \frac{1}{(N_{fe}^2 - N_{fe}) \cdot \frac{1}{2}|T|} \sum_{t \in T} \sum_{k \in J} \sum_{j \in J} \frac{|\vec{v}_j^{(t)} - \vec{v}_k^{(t)}|^2}{|\vec{p}_j^{(t)} - \vec{p}_k^{(t)}|} \quad (7.1)$$

wobei $k \neq j$ gilt. Die resultierende Geschwindigkeit $v_j^{(t)}$ eines Punktes j zum Zeitpunkt t enthält entsprechend die Anteile in Richtung ζ und ξ :

$$\vec{v}_j^{(t)} = \begin{bmatrix} v_{\zeta j}^{(t)} \\ v_{\xi j}^{(t)} \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

Im Anschluss wird über das arithmetische Mittel der Deformationsindizes aller *Edges*, mit der Anzahl I an Edges normiert:

$$\tilde{\alpha}_i = \frac{\alpha_i}{\frac{1}{|I|} \cdot \sum_{j \in I} \alpha_j} \quad (7.3)$$

Die Bewertung erfolgt im Übergang von langsamer Biegebelastung durch laterale Kräfte oder Biegemomente, bis hin zu Knickproblemen bei Belastung in axialer Richtung. Ein schnell einsetzender Stabilitätsverlust mit großen Geschwindigkeitsdifferenzen wird somit höher bewertet als langsamere Durchbiegung im direkten Vergleich. Abbildung 7.4 zeigt in einer isolierten Betrachtung die Bewertung durch den Index von drei Profilen.

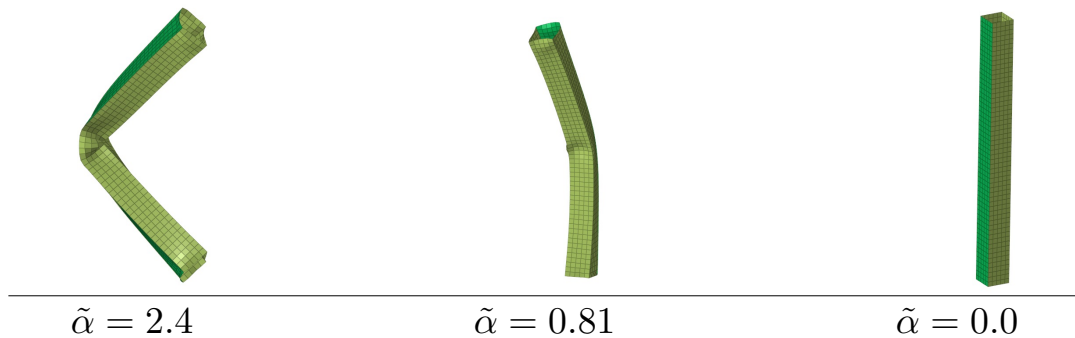


Abbildung 7.4: Auswertung für schnelle Deformation in orthogonaler Richtung zur Achse von drei isolierten Profilen zum gleichen Zeitpunkt

Die drei Zustände sind zum gleichen Zeitpunkt entstanden und im direkten Vergleich knickt das Profil mit $\tilde{\alpha} = 2.4$ deutlich schneller als die anderen beiden. Das Knickphänomen ist eine der häufigsten zu behandelnden Ereignisse im Verlauf der Optimierung mit den hier verwendeten aufgebauten Rahmenstrukturen. Aus diesem Grund werden mehrere Strategien zur Strukturmanipulation verfolgt. Das betroffene Profil kann mit verschiedene Ansätze gestützt werden. Die verschiedenen Ansätze sind für verschiedene Situationen entstanden. Für die Auswertung sind folgende Strategien für verschiedene Fälle anwendbar:

- Im ersten Ansatz wird nach der Indexierung das betroffene Profil mittig und in orthogonaler Richtung gestützt – die kürzeste Verbindungsmöglichkeit wird verwendet.
- Zwei knickende Profile werden miteinander verbunden, zusätzlich ohne Berücksichtigung von Orthogonalität.
- Die Knickrichtung wird vektoriell mit einbezogen und in entgegengesetzter Richtung eine Anbindungsstelle ermittelt, falls vorhanden.
- Ein knickendes Profil wird mit einem Profil mit niedrigster Bewertung verbunden.

Bei dem Ansatz mit einer orthogonal verlaufenden *Edge* wird stets der Verbindungspunkt mit dem geringsten Abstand verwendet. Geringe *Edge*-Längen bedeutet eine geringere Knickneigung. Die Ermittlung erfolgt über die Definition einer Ebene, die orthogonal zur stützungswürdigen *Edge* liegt. Daraufhin werden die Schnittpunkte mit den Profilachsen ermittelt. Eine weitere Möglichkeit liegt im Stützen in Knickrichtung, so dass das neue Profil auf Druck oder entgegengesetzt auf Zug belastet wird.

7.2 Nutzen von Deformationsräumen Zug und Druck

Diese Heuristiken betrachten Bereiche der Struktur, die sich aufeinander zu oder voneinander wegbewegen. Wenn ein neues Strukturelement zwischen diesen Zuständen eingebracht wird, kann dies zur Erhöhung der Stabilität führen. Für ein besseres Verständnis sind die schematischen Abläufe in den Abbildungen 7.5 und 7.6 dargestellt.

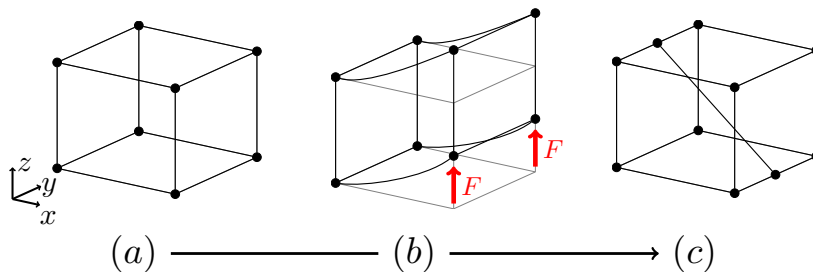


Abbildung 7.5: Schematische Darstellung *Nutzen von Deformationsräumen Druck*: Ausgangsgeometrie (a), Biegelastfall (b) und neue Struktur mit einer auf Druck belasteten *Edge* (c)

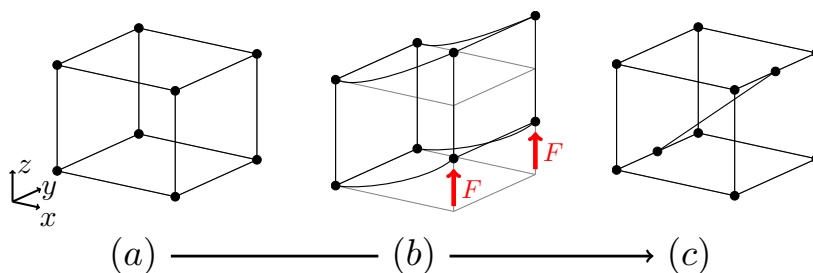


Abbildung 7.6: Schematische Darstellung *Nutzen von Deformationsräumen Zug*: Ausgangsgeometrie (a), Biegelastfall (b) und neue Struktur mit einer auf Zug belasteten *Edge* (c)

Durch die neue Verbindung wird eine Beteiligung bei der Deformation und Energieabsorption von verschiedenen Bereichen erzeugt. Bei Arealen, die sich voneinander weg bewegen, erzeugt die Heuristik *Nutzen von Deformationsräumen Zug* ein neues Element unter Zugbelastung. In Bereichen, die sich aufeinander zu bewegen, erzeugt die Heuristik *Nutzen von Deformationsräumen Druck* ein neues Element unter Druckbelastung. Die Annahmen sind hier idealisiert. Zur Auswertung der Bereiche werden die abschnittsweise ermittelten Punkte der einzelnen Profile verwendet, die auch bei *Unterstützen schnell deformierender Edges* verwendet werden. Im Wesentlichen evaluieren die Heuristiken die Abstände $d_{jk}^{(t)}$ zwischen den Profilmittelpunkten $\vec{p}_j^{(t)}$ und $\vec{p}_k^{(t)}$, $j \in J$, $k \in K$ von verschiedenen *Edges* über die Zeit:

$$d_{jk}^{(t)} = |\vec{p}_j^{(t)} - \vec{p}_k^{(t)}| \quad (7.4)$$

Daraufhin wird d_{com} zur Bewertung für Druck und d_{ten} zur Bewertung von Zug ermittelt, wobei $d_{jk}^{(t_0)}$ die Ausgangsdistanz aus dem initialen System ist:

$$d_{com} = \min(d_{jk}^{(t)} - d_{jk}^{(t_0)}), \quad t \in \{T, t \neq t_0\}, k \in K, j \in J \quad (7.5)$$

$$d_{ten} = \max(d_{jk}^{(t)} - d_{jk}^{(t_0)}) \quad , \quad t \in \{T, t \neq t_0\}, k \in K, j \in J \quad (7.6)$$

Abbildung 7.7 zeigt die Analyseebene der zylinderförmigen Rahmenstruktur mit den Abständen d_{ten} und d_{com} im Zeitpunkt t_{16} . In diesem Beispiel stellt der Zeitpunkt 16 auch den letzten Zeitpunkt dar.

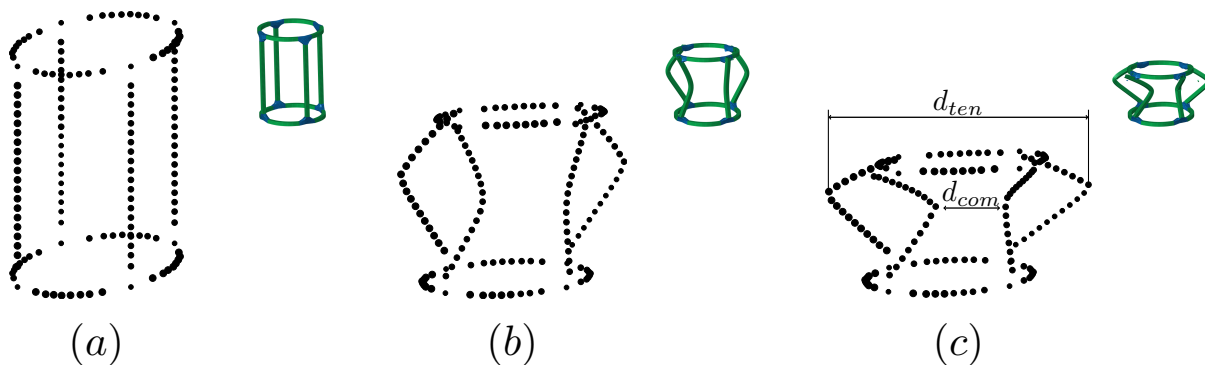


Abbildung 7.7: Zeigt eine Rahmenstruktur, die zusammen gedrückt wird und deren Analyseebene – Ausgangszustand zum Zeitpunkt t_0 (a), Zeitpunkt t_{10} (b) und Zeitpunkt t_{16} mit d_{ten} und d_{com} (c)

Als Ergebnis erzeugt jede der zwei Heuristiken einen Entwurf, bei dem jeweils die Punkte j und k verbunden werden.

7.3 Teilen langer Edges

Die grundlegende Idee ist, die Reduzierung der Chance auf Knicken durch eine Reduzierung der Profillänge (Abb. 7.8) zu erreichen. Dazu werden die physikalischen Längen der Strukturelemente herangezogen, und nach ihrer Länge hin sortiert. Danach werden die längsten *Edges* über die kürzeste Distanz miteinander verbunden. Für diese Heuristik werden keine Simulationsdaten herangezogen. Das „Länge zu Breite und Höhe“-Verhältnis eines Profils hat direkten Einfluss auf die Knickneigung. Wenn die Länge einzelner Profile bei gleichem Profilquerschnitt reduziert wird, so wird auch die Knickneigung in Richtung der Abstützung reduziert. Daraus folgt in einigen Fällen auch eine Einschränkung der Knickrichtung. Für dynamische Lastfälle und bei der Auslegung von Crashstrukturen lässt sich der direkte Einfluss generell schwer bestimmen.

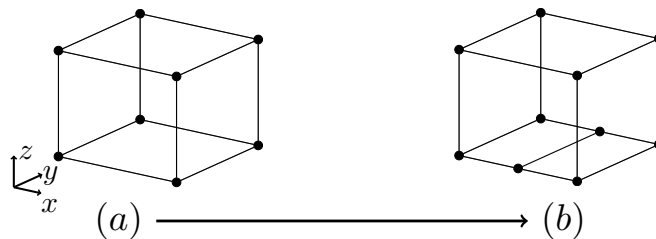


Abbildung 7.8: Schematische Darstellung *Teilen langer Edges*: Ausgangsgeometrie (a) und Erstellt eine neue *Edge* zwischen zwei langen Profilen (b)

Die Grenze zwischen einfacher elastischer Biegung oder auch plastischer Deformation aufgrund von Biegebelastung bis hin zum Stabilitätsverlust sind fließend und können sich bei der Bewertung aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeit unterscheiden. Profile können trotzdem eine hohe Strukturelevanz besitzen, auch wenn kaum eine erhöhte innere Energie oder schnellere Deformation auftritt. Die Teilung erfolgt hier stets mittig und sorgt für eine höhere Erfolgsquote bei der Verwendung von Symmetriebedingungen. Die Heuristik erzeugt einen neuen Entwurf mit einem neuen Strukturelement.

7.4 Ausgleichen der Energiedichte und Löschen unbelasteter Edges

An Stellen mit starken plastischen Deformationen liegt auch eine hohe innere Energie vor. Die Heuristik *Ausgleichen der Energiedichte* verbindet Bereiche, welche von einer hohen inneren Energie betroffen sind, mit Bereichen niedrigerer inneren Energie. Hier liegt wieder die Annahme der Beteiligung am Deformationsverhalten zugrunde, die weniger stark deformierten Bereiche mit Bereichen hoher Deformation zu verbinden. Dabei soll ein Ausgleich entstehen, siehe Abb. 7.9. Zur Auswertung wird die maximale innere Energiedichte ED_i ,

bezogen auf das Profilvervolumen V_i , verwendet und berechnet sich mit:

$$ED_i = \frac{\max \left(\sum_{w \in W} E_{i,w}^{(t)} \right)}{V_i^{(t_0)}}, \quad t \in \{T, t \neq t_0\}, i \in I \quad (7.7)$$

$E_{i,w}^{(t)}$ ist die innere Energie einer einzelnen Strukturwand w zum Zeitpunkt t einer dreidimensionalen *Edge* i . Die inneren Energien werden innerhalb eines jeden Zeitpunkts aufsummiert, um zwischen verschiedenen Ereignissen von Deformationen zu unterscheiden. Durch den dreidimensionalen Aufbau können beispielsweise Deformationen an verschiedenen Stellen über die Profillänge auftreten. Danach wird der maximale Wert mit dem Volumen dividiert. Jetzt werden die Differenzen von innerer Energie zwischen verschiedenen Profilen $i, u \in I$ und $i \neq u$ betrachtet, welche wie folgt berechnet werden:

$$\Delta ED_{iu} = |ED_i - ED_u| \quad (7.8)$$

Im Anschluss werden die ermittelten Differenzen mit dem arithmetischen Mittel dividiert:

$$\widetilde{ED}_{iu} = \frac{\Delta ED_{iu}}{\frac{1}{N_{\Delta ED}} \sum_{iu \in UI} \Delta ED_{iu}} \quad (7.9)$$

$N_{\Delta ED}$ ist die Anzahl der Energiedichtedifferenzen.

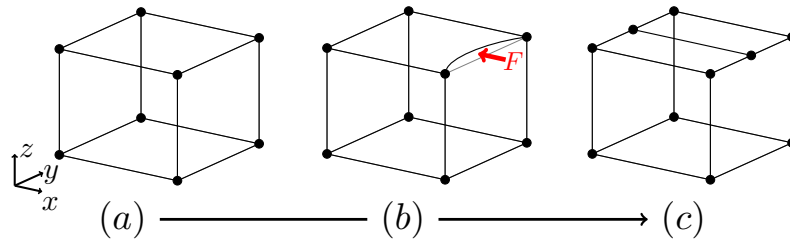


Abbildung 7.9: Schematische Darstellung *Ausgleichen der Energiedichte*: Ausgangsgeometrie (a), Auftreten hoher innerer Energie an der oberen Frontseite (b) und Struktur mit neuer *Edge* (c)

Die Heuristik *Löschen unbelasteter Edges* verwendet ebenfalls wie die Heuristik *Ausgleichen der Energiedichte* die innere Energie. Die grundlegende Idee ist, wenn die maximale innere Energie einer *Edge* im Vergleich zur inneren Energie einer anderen *Edge* gering ist, wird diese für den Deformationsprozess nicht benötigt. Das idealisierte Ziel stellt gleichbleibende oder gar bessere Struktureigenschaften nach Löschung dar. Bei einer Massenrestriktion wird infolge derer die Wandstärke der restlichen *Edges* entsprechend erhöht. In Abbildung 7.10 ist der initiale zylindrische Rahmen abgebildet und wird im Laufe von Belastungen zerdrückt.

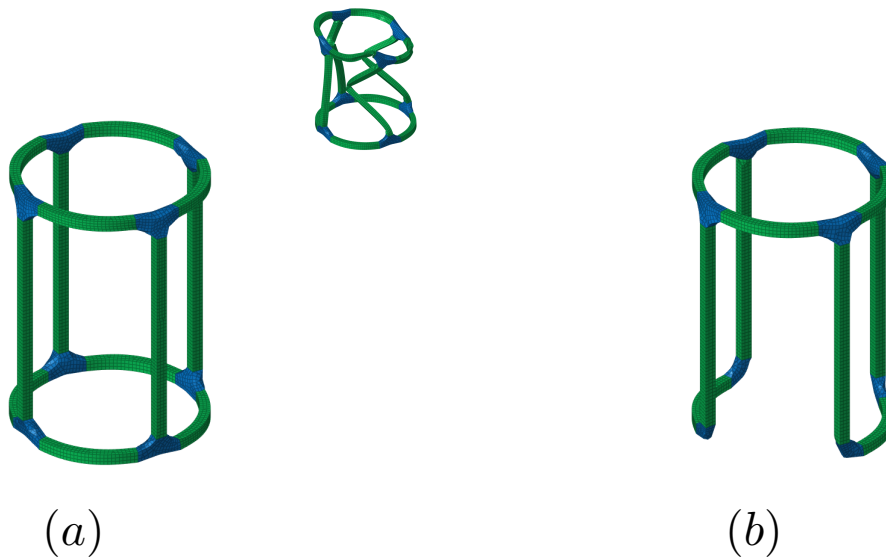


Abbildung 7.10: Entfernen von Edges mit geringerer innerer Energie: Ausgangsgeometrie (a) und Edges mit geringerer innerer Energie entfernt, Struktur im symmetrischen Aufbau (b)

Im unteren Bereich sind einige *Edges* nicht am Deformationsprozess beteiligt und können entfernt werden. Das Entfernen der Strukturteile findet ebenfalls im symmetrischen Aufbau statt. Falls offene Enden entstehen, werden diese ebenfalls entfernt. Diese Vorgehensweise kann durch eine beschränkte Anzahl limitiert werden. Außerdem können einzelne *Edges* wichtige Anbindungsstellen für beispielsweise Auflagerdefinition darstellen. Für diese Ausnahmen kann das Keyword *FIX* verwendet werden.

Dazu wird die innere Energiedichte auf Basis der Gleichung (4.7) errechnet und mit dem arithmetischen Mittel normiert:

$$\widetilde{ED}_i = \frac{ED_i}{\frac{1}{|I|} \sum_{j \in I} ED_j} \quad (7.10)$$

Das Profil mit dem kleinsten Wert wird entfernt.

7.5 Skalieren der Wandstärken und Glätten des Graphen

Die Heuristiken *Skalieren der Wandstärken* und *Glätten des Graphen* gehören zu den nicht konkurrierenden Heuristiken und erzeugen nicht aktiv eine neue Topologie. Die Heuristik *Skalieren der Wandstärken* (siehe Abb. 7.11) skaliert nach der topologischen Modifikation anderer Heuristiken die Wandstärke jedes Entwurfs.

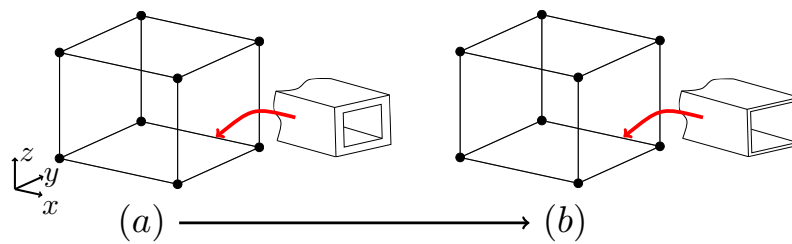


Abbildung 7.11: Schematische Darstellung *Skalieren der Wandstärken*: Ausgangsgeometrie (a) und skaliert die Wandstärken der Profile (b)

Die Wandstärke wird auf das Niveau der Masse aus der vorangegangenen Iteration skaliert, um Sprünge in der Zielfunktion zu vermeiden. Wenn ein neues Profil in die Rahmenstruktur eingefügt wird, würde die Masse der gesamten Struktur steigen. Wird ein neues Profil nach den Strategien der zuvor beschriebenen aktiven Heuristiken erstellt, werden die Wandstärken aller Profile gesenkt bzw. bei Entfernen entsprechend erhöht. Außerdem erlaubt die Heuristik so die Berücksichtigung von Massengleichheitsrestriktionen durch den gesamten Optimierungsverlauf. Umgekehrt wird im Zusammenspiel mit der Heuristik *Löschen unbelasteter Edges* die entfernte Masse der betroffenen *Edge* auf die anderen Profile durch neu Skalieren der Wandstärken umverteilt. Die Wandstärke wird mit einem Skalierungsfaktor k skaliert, um eine Zielmasse m_{target} zu erreichen.

$$k = \frac{m_{target} - m_{fixed}}{m_{current} - m_{fixed}} \quad (7.11)$$

Der Faktor berechnet sich aus der aktuellen Masse $m_{current}$ mit Anteilen aus fixierter Masse m_{fixed} . Die Wandstärke aus der aktuellen Iteration wird mit dem Faktor multipliziert. Als Ergebnis bleiben die Verhältnisse von einzelnen Wandstärken erhalten, wobei es durch den fixierten Anteil möglich ist, untere und obere Grenzen der Wandstärke zu berücksichtigen. Würde die Multiplikation mit dem Skalierungsfaktor eine Verletzung der Wandstärkenrestriktion bewirken, wäre diese Wandstärke entsprechend auf das Niveau festgesetzt. Die betroffenen Massen werden fixiert und die anderen Wandstärken weiter skaliert. Die Massengleichheitsrestriktion wird bei Zielen, wie Minimierung der Masse nicht verwendet. Gleiches gilt für das Ziel der Kontaktkraftminimierung, auch hier wird die Wandstärkenvariation als Optimierungsparameter genutzt. Die Heuristik *Glätten des Graphen* (Abb. 7.12) betrachtet die *Edges*, deren Verbindungswinkel $> 175^\circ$ beträgt. Weiterhin muss die Verbindung aus zwei zusammenlaufenden *Edges* bestehen. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, werden die zwei *Edges* durch eine *Edge* ersetzt und der nicht mehr verwendete *Vertex* entfernt. Die Heuristik wird als Ergänzung zu der Heuristik *Löschen unbelasteter Edges* verwendet.

7.6 Auswertung von Simulationsdaten

Die Auswertung zur Detektion von einzelnen Phänomenen hängt direkt von der Datenlage ab. Die Bewertung ist von der Anzahl an Zeitpunkten, die herausgeschrieben werden, aus

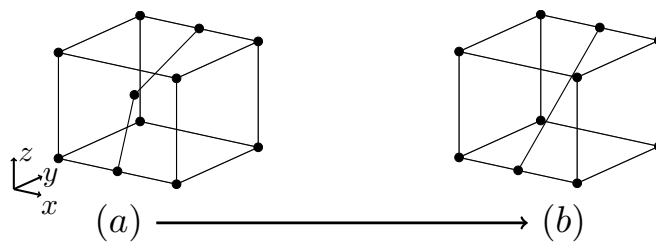


Abbildung 7.12: Schematische Darstellung *Glätten des Graphen*: Ausgangsgeometrie (a) und Begradigt zwei *Edges* (b)

dem expliziten FEM-Solver abhängig. Die Ausgabe für Verschiebungen, Geschwindigkeiten und Energien müssen stets für alle Finite-Elemente und -Knoten der Rahmenstruktur herausgeschrieben werden. Bei größeren Modellen steigt der Bedarf an Speicherplatz sehr schnell an. Für den Fall, dass die Auswertung für unterschiedliche Strukturelemente zu gleichen Ergebnissen führt, entscheidet die Lage im Speicherfeld. Diese kann dann beispielsweise aus der Reihenfolge im Graphen-File resultieren welches zu Beginn eingelesen wird. Dabei handelt es sich um eine Auswertungslücke, die für diesen Prozess noch nicht gelöst wurde. Ein Beispiel ist die Bewertung der inneren Energie, wenn diese für verschiedene Strukturteile z.B. wegen Elementlöschungen oder ohne Belastung null ist, dann werden die *Edges* der Reihe nach aus dem Speicherfeld gelöscht. Grundsätzlich kann die Annahme der gleichen Bewertung akzeptiert werden, doch das Löschen von unterschiedlichen Teilen an verschiedenen Stellen, kann zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Hierzu sollte eine Verbesserung je Situation und Heuristik erfolgen. Zur Löschung könnten zusätzliche Kriterien zur Beschreibung des Ortes innerhalb der Struktur eingesetzt werden.

7.7 Strategien zur besseren Verbindungsmöglichkeit

Zur Verbesserung der Struktureigenschaften werden in erster Linie neue Verbindungen innerhalb der Struktur realisiert. Dazu werden die bestehenden *Edges* aufgetrennt und neue *Vertices* eingesetzt und neu verbunden. An diesen *Vertices* werden im Anschluss neue Strukturelemente eingesetzt. Grundlegend werden dazu zwei Strategien verfolgt. Kritische Stellen innerhalb der Struktur werden als Strategie mittig gestützt, wie bei vergleichsweise dazu schneller orthogonal verlaufender Deformation. Außerdem wird bei der Detektion von beispielsweise Zug- und Druckräumen die ermittelten Positionen direkt verbunden. Aufgrund der Vielfalt an Verbindungsmöglichkeiten führen diese Einschränkung und zusätzlich noch die Möglichkeit von Komplexitätsreduktion mit Symmetrieverbindungen zur verbesserten Struktureigenschaften. Zusätzlich zu diesen zwei Strategien wird eine zusätzliche Abtastung bei Position 25% und 75% der Länge nach getestet. Besonders bei der Verwendung von Symmetrie erhöht sich die Anzahl an möglichen Entwürfen dadurch deutlich.

Falls eine Verbindungsmöglichkeit gefunden wird und eine neue *Edge* erzeugt werden konnte, kann im Anschluss ein einheitlicher Querschnitt nach Vorgabe zugewiesen werden. Außerdem können Querschnitte der *Edges* an neue *Edges* weitergegeben werden, die als kritische

Ziele gestützt werden sollen. Das lässt zusätzlich Verbesserungspotential zur Vergabe von belastungsgerechten Querschnitten offen.

7.8 Unterscheidung zwischen stark dynamischen und statischen Lastfällen

Die heuristischen Prozeduren sind in der Lage, Daten mehrerer Lastfälle zu verarbeiten. Bisher existiert in diesem Ablauf keine Gewichtung von Lastfällen. Des Weiteren werden die Heuristiken einige Bewertungskriterien und kritische Stellen im Verhältnis aus. Im Deformationsprozess von crashbelasteten Strukturen treten häufig markante Situationen oder Phänomene auf, die sich in der Datenlage mit dem beschriebenen Bewertungsschema detektieren lassen. Im Vergleich zu Lastfällen mit statischen Belastungen und linearen Materialeigenschaften mit kleinen zulässigen Verschiebungen stellt das einen großen Unterschied dar. Grundsätzlich können beispielsweise Simulationsmodelle mit statischen Lasten und einem impliziten Solver im Optimierungsprozess insgesamt eingebunden werden. Aufgrund der großen Unterschiede von Verschiebungen und Plastizität wird die Annahme des geringen Einflusses von statischen Lasten angenommen und lediglich Daten von Crashlastfällen zur Auswertung in den heuristischen Prozeduren zugelassen. Außerdem sind Daten, wie Geschwindigkeit durch plastische Deformation, in den Ergebnissen der Simulationsmodelle mit statischen Lasten hier bisher nicht enthalten. Die Modelle mit impliziter Berechnung können dennoch im Gesamtprozess mittels Restriktionen berücksichtigt werden. Der Einfluss bzw. die Anforderungen werden über die innere Optimierungsschleife mittels Wandstärkeevaluation berücksichtigt. Dieser Prozess wird im nachfolgenden Kapitel 8 beschrieben.

8 Ablauf der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung

In diesem Kapitel wird der Optimierungsablauf in spezifischer Form beschrieben, Ortmann, 2015, Schumacher und Beyer, 2020, Beyer et al., 2021. Charakteristisch für das Verfahren ist die Geometriebeschreibung abstrahiert durch einen Graphen. Außerdem wird das Optimierungsproblem mit zwei ineinanderlaufenden Optimierungsschleifen behandelt.

8.1 Funktionsweise des Optimierungsablaufs

In der äußeren Schleife findet die topologische Modifikation durch Manipulation des Graphen statt. Im Optimierungsablauf der GHT3D werden mehrere Entwürfe innerhalb einer Optimierungsschleife berechnet. Jeder Entwurf wird von einer der konkurrierenden, in Kapitel 7 beschriebenen, Heuristiken generiert. In jeder Iteration erstellen N_h als Anzahl an Heuristiken bis zu $N_h \cdot N_{ke}$ neue Entwurfsvorschläge für die Reihe N_{ke} als Anzahl bester konkurrierender Entwürfe aus vorangegangener Iteration. Abbildung 8.1 zeigt eine Übersicht des Optimierungsablaufs.

Jeder Entwurf wird mit einer oder mehreren Finite-Elemente Simulationen und mehreren Lastfällen berechnet und die besten Zielfunktionswerte je Entwurf werden nach ihrer Höhe sortiert. Grundsätzlich ist die Anzahl an Entwürfen, die in die nächste Iteration übernommen wird variable, standartmäßig werden die besten 5 Entwürfe gewählt. Diese Vorgehensweise bildet einen selektiven Prozess ab, denn durch das festgelegte Ziel und die festgelegten Restriktionen, werden nur bestimmte Entwürfe mit in die nächste Iteration übernommen. Die Entwürfe werden nach ihrem Zielfunktionswert oder falls keine Entwürfe im zulässigen Bereich liegen nach der Höhe ihrer Unzulässigkeit bewertet. Diese *Constraint violation* bildet den nominalen Abstand der restringierten Werten zur Restriktionsgrenze in [%]. Bei mehreren Restriktionsverletzungen wird die Summe aller verletzten Werte herangezogen.

Die Heuristiken generieren in Abhängigkeit des Lastfalls unabhängig von den formulierten Zielen einen topologisch geänderten Entwurf. Würde das Ziel geändert werden und der Lastfall beibehalten, würden in der ersten Iteration voraussichtlich die gleichen Entwürfe erzeugt. Erst darauf aufbauend in höheren Iterationen entwickeln sich die Entwürfe entsprechend durch ihrer Bewertung nach in Zielrichtung.

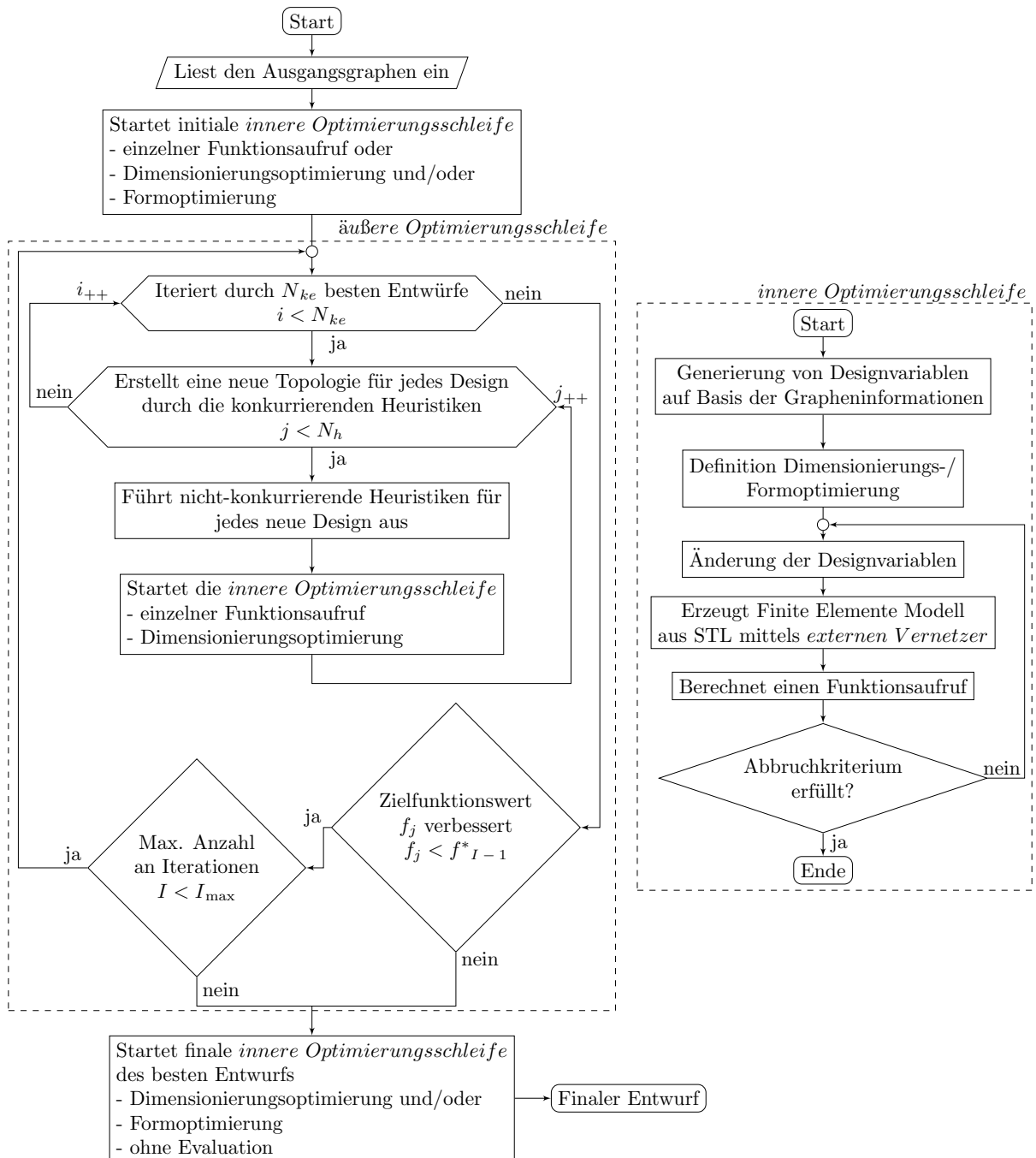


Abbildung 8.1: Ablaufdiagramm der verschachtelten Optimierungsschleifen. Die äußere Optimierungsschleife ändert die Topologie und die innere Optimierungsschleife führt Form- und Dimensionierungsoptimierungen aus

Die Optimierungsschleife bricht ab, wenn kein Entwurf mehr zu einer Verbesserung des Zielfunktionswerts führt oder die maximale Anzahl an Iterationen durchlaufen wurde. Falls sich der Zielfunktionswert nicht mehr ändert, kann daraufhin dennoch eine zuvor eingestellte Anzahl an Iterationen erfolgen, um ggf. noch bessere Entwürfe zu finden. In der inneren Optimierungsschleife können mit Form- und Dimensionierungsoptimierungen einzelne Entwürfe optimiert und gleichzeitig bewertet werden. Der Ablauf kann in verschiedenen Varianten ausgeführt werden. Eine mögliche Strategie zur Ausführung der Prozedur kann wie folgt eingestellt werden: Der Ausgangsgraph wird mit einer Formoptimierung evaluiert und danach wird automatisiert die topologische Graphenmodifikation des besten Entwurfs gestartet. Nachdem die Heuristiken nach mehreren erfolgten Iterationen keine Verbesserungen mehr erzielen, kann am Ende der beste Entwurf mit einer umfangreichen Dimensionierungsoptimierung weiter optimiert werden, um den Zielfunktionswert weiter durch eine geänderte Materialverteilung zu minimieren. In erster Linie wurde in der Entwicklung auf einen modularen Aufbau Wert gelegt, denn für verschiedene Optimierungsziele und Lastfälle können unterschiedliche Optimierungsstrategien zu unterschiedlich guten Entwürfen führen. Die Ausführung wird dadurch ermöglicht, dass die innere Optimierungsschleife an verschiedenen Stellen aufgerufen werden kann. Anstelle der meist umfangreichen inneren Optimierung ist ebenfalls eine Bewertung der Entwürfe durch einen einzelnen Funktionsaufruf möglich.

8.2 Ähnlichkeit von Entwurfsvorschlägen durch aktive Heuristiken

Die Heuristiken agieren unabhängig voneinander, was zur Folge haben kann, dass in einer Iteration sehr ähnliche oder gar identische Entwürfe durch verschiedene Heuristiken erzeugt werden. Falls dabei äquivalente Entwürfe mit sehr guten Eigenschaften entstehen, würden weitere anders gestaltete Entwürfe im selektiven Prozess verdrängt werden und das führt zum Verlust von Potential. Um innerhalb des Optimierungsablaufs diese Dopplung zu vermeiden, wird der geometrische Aufbau durch die Lage jedes Vertex zwischen den Graphen verglichen und bei Übereinstimmung der Graph des aktuellen heuristikbasierten Vorschlags verworfen. Die bereits während des Optimierungsablaufs erstellten Entwürfe aus vergangenen Iterationen werden als Vergleich herangezogen und den heuristischen Prozessen zum Abgleich zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 8.2).

Jeder neue zulässige Entwurf wird direkt innerhalb der aktuellen Iteration als bekannter Entwurf eingestuft. Dadurch wird jeder aktuell zulässige Entwurf direkt für nachfolgende heuristische Manipulation berücksichtigt. Dieser Abgleich findet in diesem Optimierungsverfahren am Ende jeder aktiven Heuristik zur topologischen Manipulation statt. Erzeugt eine Heuristik einen bereits vorhandenen Entwurf, verwirft sie den Vorschlag und generiert einen neuen Vorschlag, basierend auf der nächsten kritischen identifizierten Stelle. Dadurch erhöht sich die Chance maßgeblich, einen neuen Entwurf von jeder Heuristik pro Iteration zu erhalten.

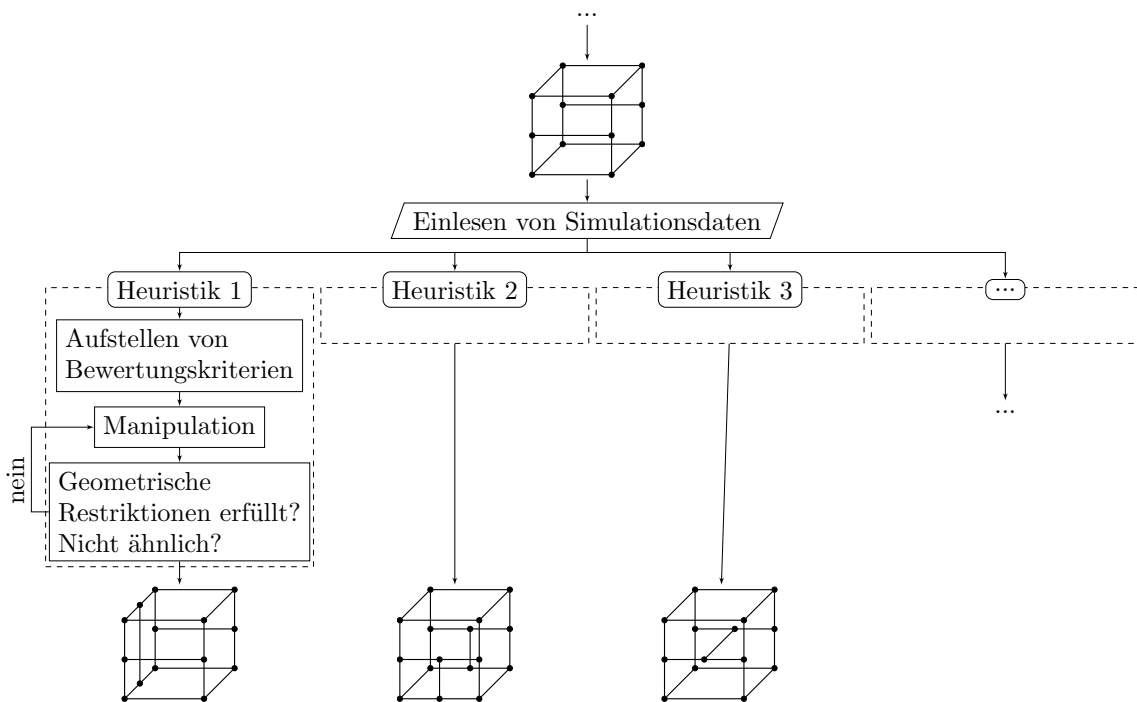


Abbildung 8.2: Parallele Entwurfserzeugung – Erneute Erzeugung durch nicht Einhalten von Restriktionen oder schon vorhandenen Graphen

8.3 Innere Optimierungsschleife

In der inneren Optimierungsschleife kann jeder Entwurf etwas detaillierter untersucht werden. Somit werden innerhalb jeder Iteration, aus der äußeren Optimierungsschleife heraus, zeitgleich mehrere eigenständige Optimierungsprobleme gestartet und ausgewertet. Grundsätzlich entsteht durch die topologische Änderung und dem damit neu erzeugten Strukturelement eine geänderte Struktursteifigkeit. Mittels *Design of Experiments (DoE)*, Optimierungsverfahren, wie *Successive Response Surface Method (SRSM von LS-OPT – Theory Manual v.7.0)* oder generisch evolutionären Algorithmen, können Wandstärken so ermittelt werden, dass die Struktureigenschaften für die Entwürfe entsprechend nah an den Restriktionsgrenzen liegen. Die geänderte Struktursteifigkeit wird über die Evaluation der Wandstärke in jeder Iteration kompensiert, um möglichst nah an den Restriktionsgrenzen über die Iterationen hinweg zu verbleiben.

8.3.1 Grundlegende Strategien für verschiedene Ziele

Für die Evaluation einzelner Entwürfe werden in der Regel die Wandstärkengrenzen mit fertigungstechnischem Einfluss festgelegt. Außerdem wird so dem Verfahren mit dieser Wandstärkeevaluation ermöglicht, individuell benötigte Masse hinzuzuziehen oder zu entfernen. Diese Strategie findet bei Problemen zur Kontaktkraftminimierung Anwendung. Mit dem Massenerhalt als Gleichheitsrestriktion werden hingegen Ziele betrachtet, wie „Minimiere die Intrusion“. Dazu lassen sich folgende für die in dieser Arbeit verwendeten Strategien als

Beispiele zusammenfassen:

- Minimiere die Intrusion: Verwendung von Massengleichheitsrestriktion, bei einem Funktionsaufruf in der inneren Optimierungsschleife
- Minimiere die Intrusion: Setzen einer Massengleichheitsrestriktion und zweidimensionaler Betrachtung oder eindimensional im Verhältnis, mehrere Funktionsaufrufe in der inneren Optimierungsschleife
- Minimiere die Masse: Einstellen von z.B. Verschiebungsrestriktion und eindimensionaler Betrachtung, bei mehreren Funktionsaufrufen in der inneren Optimierungsschleife
- Minimiere die Kontaktkraft: Verschiebungsrestriktion definieren, bei eindimensionaler Betrachtung und mehreren Funktionsaufrufen in der inneren Optimierungsschleife

Bei dem Ziel „minimiere die Intrusion“ sollte stets die maximal zur Verfügung stehende Masse genutzt werden, da hier grundsätzlich die Annahme der geringsten Intrusion unterstellt wird. Die Wandstärke wird auf den maximal zulässigen Wert skaliert, beschränkt durch die zu Beginn festgelegte Masse.

Für die anderen Strategien können mehrere Funktionsaufrufe mit unterschiedlichen Wandstärken erfolgen. Die Abtastung der Wandstärke in der inneren Optimierungsschleife kann über ein *Spacefilling* oder auch *Latin Hypercube sample* usw. als DoE erfolgen. Die Strategien stellen Handlungsvorschriften zur ein- und mehrdimensionalen Untersuchung von Entwurfsräumen bereit. Dabei wird entschieden, in welchen Bereichen im Entwurfsraum Stützstellen erzeugt werden. Bei einer eindimensionalen Betrachtung genügen in der Regel auch einfache äquidistant verteilte Funktionsaufrufe. Falls die Differenz zwischen oberer und unterer Wandstärkengrenze dazu führt, dass die Abtastung bei wenig Funktionsaufrufen zu dünn besiedelt ist, kann zusätzlich zur Eingrenzung, für eine genauere Abtastung um den Bereich der Restriktionsgrenze, die obere und untere Wandstärke dynamisch mit $\pm t_{dyn}[\%]$ aus der vorangegangenen Iteration ermittelten Wandstärke angepasst werden. Die Vorgehensweise wird in Abbildung 8.3 schematisch dargestellt und entspricht grundlegend dem *Panning and Zooming* der *SRSM* (siehe Kapitel 8.5). Diese Strategie kann Funktionsaufrufe einsparen oder für eine genauere Abtastung im Bereich der Restriktionsgrenze genutzt werden. Falls die Restriktionsgrenze eher im mittleren Parametersegment liegt, sind die Funktionsaufrufe im Randbereich ggf. weniger von Interesse. Liegt hingegen die Restriktionsgrenze im Randbereich, dann ist entsprechend die entgegengesetzte Grenze weniger von Interesse. Das hängt dabei vom Anwendungsgebiet, definierter Last und ggf. unterer oder oberer möglicher Wandstärkengrenze aus fertigungstechnischer Sicht ab. In diesem Prozess werden die Wandstärkengrenzen GHT3D-seitig für die einzelnen DoEs in der inneren Optimierungsschleife dynamisch angepasst. Die ursprünglichen oberen und unteren Grenzen der Wandstärke sind dennoch vorhanden. Hierzu wird nah an der Restriktionsgrenze mit prozentualer Abweichung obere und untere Wandstärke angepasst. Die Frage nach der besten Strategie lässt sich oft nur situationsabhängig beantworten. Dazu liegen nicht nur Fragestellungen mechanischer Natur zugrunde, sondern auch welche Ziele, Lastfälle und Restriktionen verfolgt werden.

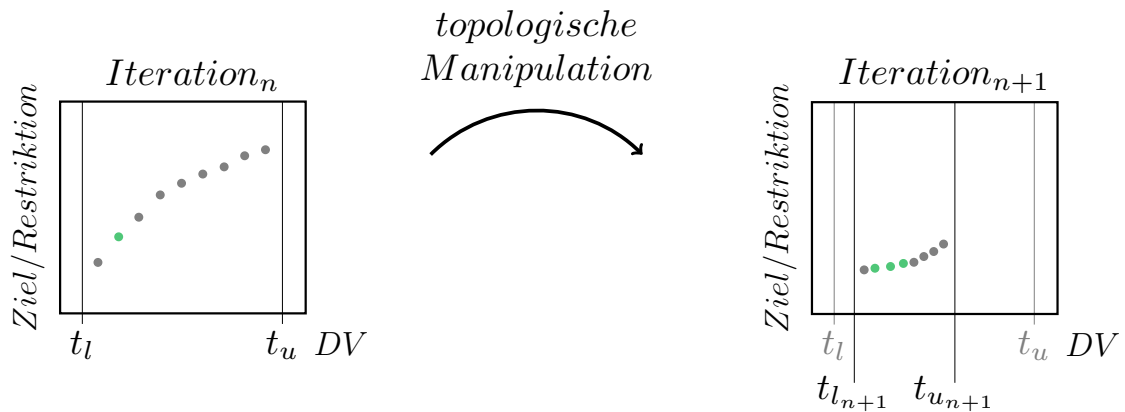


Abbildung 8.3: Zeigt die Änderung der oberen und unteren Wandstärkengrenzen bei aufeinander folgenden Entwürfen

8.3.2 Aktivierung von Restriktionen

Die in dieser Arbeit verwendeten initialen Rahmenmodelle mit den dazu aufgesetzten Lastfällen mit Verschiebungsrestriktionen sind ohne innere Struktur. Zu Beginn der Optimierung stellen diese in der Regel nicht zulässige Entwürfe dar. Aufgrund des leeren Bauraums fehlt den Rahmenmodellen die nötige Struktursteifigkeit, um die geforderten Verschiebungsrestriktionen einzuhalten. Desto höher die Anzahl an Iterationen, in der keine zulässigen Entwürfe entstehen, desto schlechter ist die Chance auf zufriedenstellende Entwürfe. Grundsätzlich werden bei Rahmenstrukturen in Kombination mit dem GHT3D-Prozess mehr Iterationen benötigt, um eine gewisse Struktursteifigkeit zu erzielen, um in einen zulässigen Bereich zu gelangen. Im Folgenden sind mögliche Verfahrensweisen aufgezählt:

- In den ersten Iterationen wird nur für jeden Entwurf einen einzelnen Funktionsaufruf verwenden, um mit Zeitersparnis in höhere Iterationen mit mehr Struktursteifigkeit zu gelangen. Sobald zulässige Entwürfe entstehen, wird die Wandstärkenevaluation eingesetzt und die Bewertung durch Restriktionsgrenzen aktiviert.
- Die Wandstärkenevaluation ist zu Beginn aktiv und zusätzlich wird eine *Constraint Violation* bestimmt. Dazu wird die normierte Differenz der Strukturantwort zur Restriktionsgrenze in Prozent bewertet und aufsummiert. Die Entwürfe werden nach dieser *Violation* sortiert bis zulässige Entwürfe entstehen. Im Anschluss wird nach dem Zielfunktionswert bewertet und im Übergang reihen sich Entwürfe entsprechend der ermittelten *Violation* ein.
- Fehlende Struktursteifigkeit mit stark erhöhten Wandstärken kompensieren und in höheren Iterationen strenger restringieren.

8.3.3 Anzahl von Rechnungen und Iterationen

Wenn die Modelle ausreichend schnell berechnet werden und Unsicherheiten bezüglich der Abtastung vorhanden sind, sollte die Abtastung in vollem Umfang der zur Verfügung ste-

henden Ressourcen detailliert erfolgen. Zusammengefasst können folgende innere Optimierungsstrategien als Möglichkeiten benannt werden:

- Abtastung durch eine einfache DoE mit äquidistant verteilten Punkten, der beste Punkt wird als Bewertung des Entwurfs verwendet
- Einsatz von Sequentiellen Response Surface Methode von (bsp. SRSM – LS-OPT) mit einer 2 Iterationen-Strategie: 9:1, 9 Punkte (Anzahl kann variieren) werden berechnet und eine zusätzliche Berechnung mit Metamodell-basierten Parametern des prognostizierten Optimums als Chance zur Verbesserung
- Verwendung von Sequentiellen Response Surface Methoden (bsp. SRSM – LS-OPT) mit einer 3 Iterationen-Strategie 3:3:1, die 3 Punkte der zweiten Iteration werden auf Basis der 3 Punkte aus der ersten Iteration gesetzt. Chance auf frühzeitige Konvergenz.

Die innere Optimierungsschleife wird somit in der Regel mit wenigen (1-10) Funktionsaufrufen für die Evaluation der Entwürfe mit topologischer Änderung ausgeführt. Zusätzlich können umfangreichere Wandstärken- und Formoptimierungen ausgeführt werden. Die Anzahl der Funktionsaufrufe kann und sollte für die jeweilige Situation angepasst werden.

8.4 Interpolation und Approximation mit Radial Basis Funktionen

Metamodelle sind Ersatzmodelle, die mit beschränkten Informationen erzeugt werden. Dadurch lässt sich eine fehlerbehaftete Aussage für Bereiche zwischen den Stützstellen treffen. Jeder Punkt $P_{(x_j, y_j)} \in D_M$ als Menge hat Einfluss auf das Metamodell \tilde{f}_x . Der Einfluss wird durch die *Euklidische Distanz* $r = \|x_j - x_i\|$ geltend gemacht. So haben Punkte im unmittelbaren Umfeld einen höheren Einfluss, als Punkte, die weiter weg liegen. Die Standardform der Radial Basis Funktionen (Buhmann, 2003) lautet:

$$\tilde{f}_x = \sum_{i=1}^N \omega_i \Phi(\|x_j - x_i\|) \quad (8.1)$$

Hierbei wird über die Anzahl der Zentren x_i aufsummiert. Dadurch findet eine Überlagerung von in der Regel mehreren Funktionen statt. Zur Bestimmung des Metamodells werden die Parameter $\omega_1 \dots \omega_N$ (*Gewichtungen*) ermittelt. Die Anzahl der gesuchten Parameter entspricht der Anzahl an Zentren. Zur Lösung wird ein Gleichungssystem für N Gleichungen mit N Unbekannten aufgestellt. Dazu wird eine Auswahl von Basisfunktionen Φ aus der Tabelle 8.1 aufgezeigt. Gleichung 7.1 wird z.B. mittels Gauß-Ansatz zu:

$$\tilde{f}_x = \sum_{i=1}^N \omega_i e^{(-\gamma \|x_j - x_i\|^2)} \quad (8.2)$$

Für eine einfache Interpolation, sodass ein Metamodell durch jeden Punkt verläuft, kann die Standardform gleich mit den Ausgangswerten der Datenpunkte gesetzt werden.

Tabelle 8.1: Auswahl von Radial Basisfunktionen

Name	Definition	Einschränkung $r > 0$
Gauß	$\Phi_{(r)} = e^{-(\gamma r)^2}$	
kubisch	$\Phi_{(r)} = r^3$	
Multiquadratisch	$\Phi_{(r)} = \sqrt{\gamma^2 + r^2}$	
Multiquadratisch invertiert	$\Phi_{(r)} = \frac{1}{\sqrt{\gamma^2 + r^2}}$	
Polyharmonic spline	$\Phi_{(r)} = r^k$	$k \in \mathbb{N}_u$
Thin plate spline	$\Phi_{(r)} = r^k \ln(r)$	

Das Gleichungssystem $\Phi \vec{\omega} = \vec{y}$ sieht wie folgt aus:

$$\begin{bmatrix} \Phi(\|x_1 - x_1\|) & \Phi(\|x_1 - x_2\|) & \cdots & \Phi(\|x_1 - x_i\|) \\ \Phi(\|x_2 - x_1\|) & \Phi(\|x_2 - x_2\|) & \cdots & \Phi(\|x_2 - x_i\|) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi(\|x_j - x_1\|) & \Phi(\|x_j - x_2\|) & \cdots & \Phi(\|x_j - x_i\|) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{(x_1)} \\ f_{(x_2)} \\ \vdots \\ f_{(x_i)} \end{bmatrix} \quad (8.3)$$

Für die Interpolation entspricht jeder Punkt einem Zentrum. Zur Lösung des Gleichungssystems wird die Matrix Φ invertiert, um die Gewichtungen $\vec{\omega} = \vec{y} \Phi^{-1}$ zu erhalten. Zur Anpassung der Form jedes Zentrums enthält ein Teil der Basisfunktion einen individuellen Faktor γ . In Abbildung 8.4 zeigt sich der Einfluss des Formfaktors γ um ein Zentrum 0. Bei großen γ wird die Funktion eher gestreckt und für kleine γ gestaucht. Für eine Approximation verändert sich das Verhältnis von Anzahl an Punkten zu Anzahl an Zentren. Grundsätzlich werden für die Approximation Cluster-Algorithmen eingesetzt, wie *k-Means – Algorithmus* oder auch *Lloyd's – Algorithmus*. Die Algorithmen dienen dem Zweck, die Datenpunkte in Bereiche um ein Zentrum herum zuzuordnen, bzw. zu clustern. Zur Clusterung (*Gruppierung*) mittels *k-Means – Algorithmus* wird zu Beginn eine feste Anzahl an Zentren vorgegeben und zufällig verteilt. Das Ergebnis ist von dieser Vorgabe abhängig, hierbei können bessere Ergebnisse durch andere Startpunkte entstehen. Alle Daten werden dem jeweils nächsten nahestehendem Zentrum zugeordnet und im Anschluss werden die Zentren neu bestimmt. Außerdem variiert die Anzahl an Datenpunkten, die einem Cluster zugeordnet wird. Dieser Vorgang wird so lange iterativ ausgeführt, bis eine maximale Anzahl an Iterationen erreicht wurde oder sich nichts mehr ändert.

Durch die ungleiche Anzahl an Punkten und Zentren folgt eine nicht quadratische Matrix $N < J$ für die Bestimmung der Gewichtungen. Es entsteht ein Gleichungssystem mit N Gleichungen, mit dem $\Phi \vec{\omega} \approx \vec{y}$ angenähert wird. Dazu muss sichergestellt sein, dass $\Phi \Phi^T$ invertierbar ist, um so über die verallgemeinerte Inverse $\vec{\omega} = (\Phi \Phi^T)^{-1} \Phi^T \vec{y}$ die Wichtungen zu bestimmen. Im Gegensatz zur Interpolation entsteht eine Lösung mit Abweichung zu den Datenpunkten. Gamma muss iterativ bestimmt werden und das für jedes Zentrum individuell. Dazu kann ein initiales γ von 1 vorgegeben und entsprechend die Wichtungen ω_i ermittelt werden.

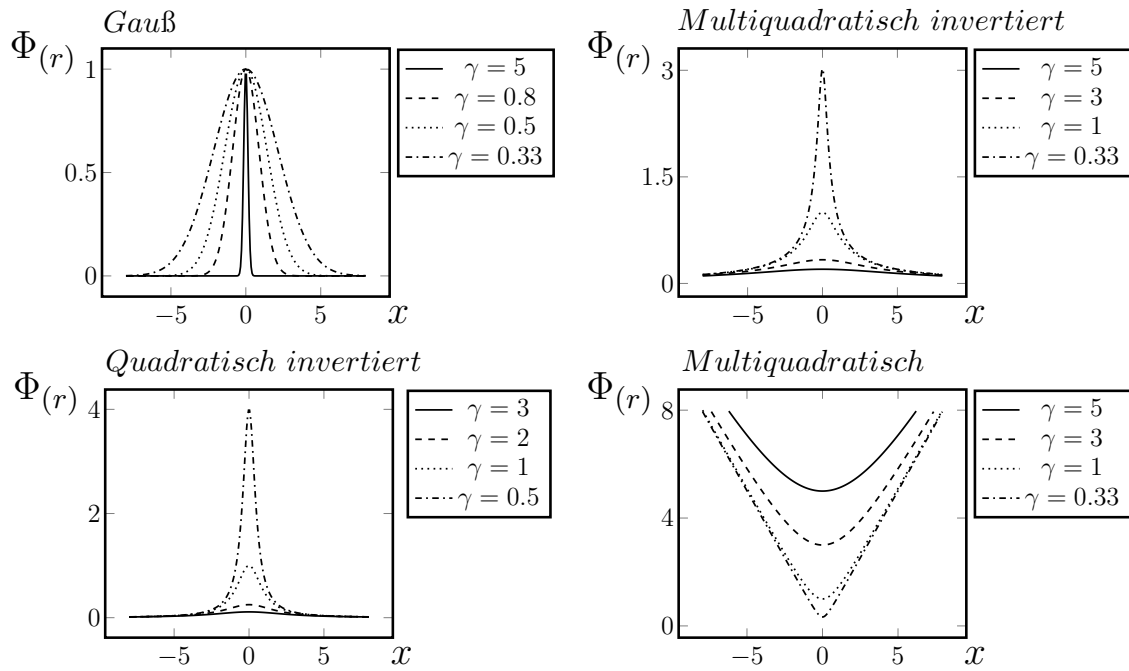


Abbildung 8.4: Zeigt den Einfluss von γ auf die Radial Basisfunktionen

Im Anschluss erfolgt erneut die Bestimmung der γ -Werte im Wechsel. Dazu besteht die Möglichkeit, die Strategien, wie das Durchtesten verschiedener Kernel-Ansätze oder die schrittweise Erhöhung der Anzahl von Zentren, automatisiert einzusetzen. Als Kriterium kann die Abweichung oder eine *Cross Validation* herangezogen werden. Für die Implementierung sollten aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Größen, wie Kraft, Masse oder Verschiebung, stets normierte Werte verwendet werden. Die Eignung von Radialen Basisfunktionen als Metamodell für den Ablauf der GHT3D in der inneren Optimierungsschleife mit jeweils wenig Funktionsaufrufen zeigt sich in Abbildung 8.5. Die Approximationen sind mit dem *Multiquadratischen* Kernel-Ansatz (Hardy, 1971, 1990) entstanden. Bei den erzeugten Daten lassen sich bei eindimensionaler Betrachtung die Stellen der Restriktionsgrenzen mit wenig Aufwand ermitteln. Dabei sind überwiegend annähernd linear anmutende Verläufe oder Teilverläufe ersichtlich. Auch bei nicht physikalischen Einflüssen, wie das frühzeitige Stoppen von Simulationen als Zeitersparnis im Falle der Restriktionsfunktion für Verschiebungen (Abb. 8.5 (b)) oder bei hoher Schwankung im Fall der Kontaktkraft in Abhängigkeit des Durchmessers der Profile (Abb. 8.5 (c)), zeigen sich mit der Anzahl von 8–10 Stützstellen adäquate Modelle. Die Radial Basisfunktionen bieten hier die nötige Flexibilität. Außerhalb des Bereichs der Datenpunkte verzeichnen die Approximationen in der Regel große Abweichungen. Eine der Schwierigkeiten besteht darin, die Modelle so zu erzeugen, dass es nicht zu *overfitting* kommt. Dabei handelt es sich um eine Überanpassung und kann eintreten, wenn zu viele deklarierte Variablen enthalten sind. Umso mehr Zentren gewählt werden, desto eher werden die einzelnen Stützstellen direkt miteinander verbunden, obwohl eine saubere Glättung erwartet werden sollte. Die Kombination aus Anzahl der Zentren und verschiedener

Startwerte von γ , haben beispielsweise darauf einen Einfluss und sind von der individuellen Situation abhängig.

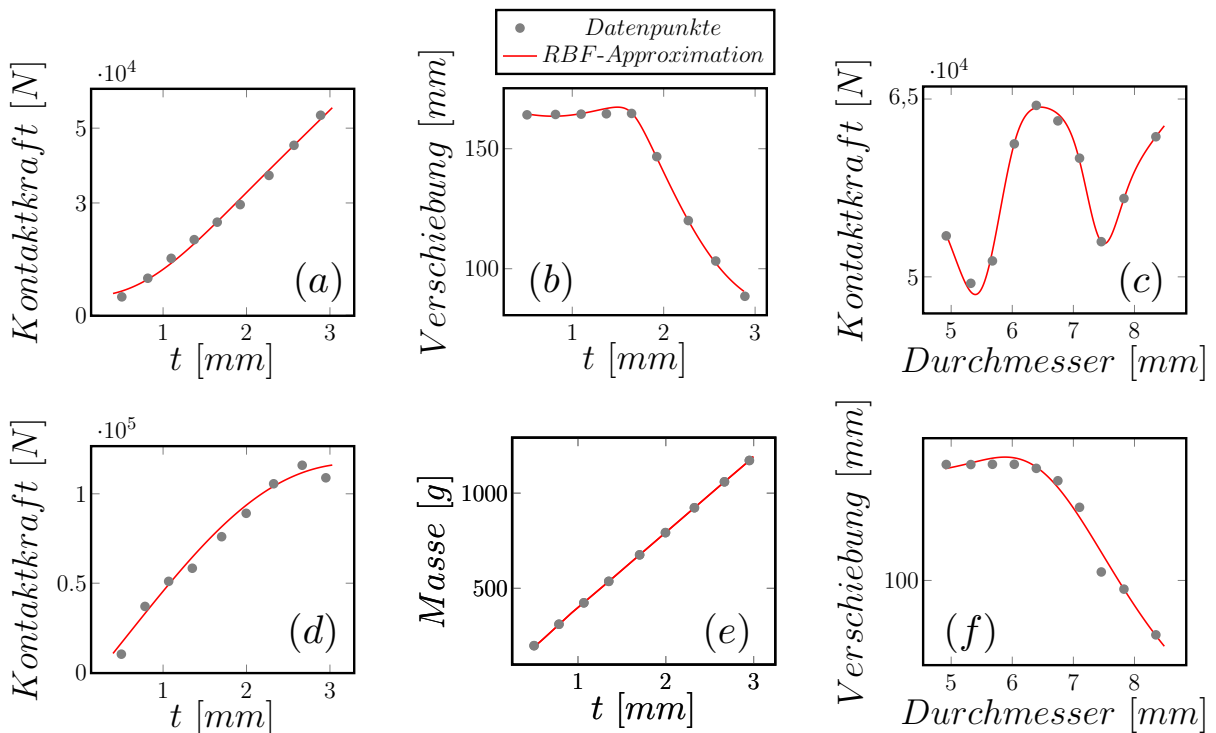


Abbildung 8.5: Zeigt verschiedene Zusammenhänge, die in der inneren Optimierungsschleife des GHT Ablaufs vorkommen können ($t = \text{Wandstärke}$). Die Approximationen sind mit einem eigenen multidimensionalen RBF-Programmcode erzeugt.

8.5 Optimierungsverfahren *Sequential Response Surface Method*

Response Surface Methoden stellen eine Sammlung von mathematischen und statistischen Verfahren und können zur Optimierung von komplexen Systemen genutzt werden. Die Entwicklungen reichen bis zu Box und Wilson, 1951 zurück. Dabei handelt es sich grundlegend um metamodellbasierte Optimierungsverfahren, die ohne Gradienten auskommen. Für den Ablauf können lineare Funktionen (Regressionsmodelle) zur Approximation von Zielfunktionen und Restriktionsfunktionen eingesetzt werden, um den Zusammenhang der Eingangs- und Ausgangsparameter abzubilden:

$$\tilde{f}_x = \beta_{j,0} + \sum_{i=1}^N (\beta_{i,j} x_i) \quad (8.4)$$

N ist die Anzahl an Designvariablen. Außerdem wird in dem Verfahren iterativ zwischen Ergebnissen aus dem zu optimierenden System und den Metamodellen gewechselt. In jeder

Iteration können die neuen Daten adaptiv für eine genauere Approximation genutzt werden. Die Gleichung für Regression zweiter Ordnung kann wie folgt aufgestellt werden:

$$\tilde{f}_x = \beta_0 + \sum_{i=1}^N (\beta_i x_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N (\beta_{i,j} x_i x_j) + \sum_{i=1}^N (\beta_{i,i} x_i^2) \quad (8.5)$$

Die Parameter $\beta_{i,i}$ sind für quadratische Effekte des i -ten Faktors und $\beta_{i,j}$ sind für Wechselwirkung zuständig. Die Koeffizienten können mittels der Methode kleinster Fehlerquadrate bestimmt werden. Dazu wird die Summe der quadratischen Abweichung der einzelnen Stützstellen x_s zur Approximation minimiert:

$$\min_{\beta} Q = \sum_{i=1}^N (f_{x_s} - \tilde{f}_{x_s})^2 \quad (8.6)$$

Anstelle von polynomial Funktionen können auch Radiale Basis Funktionen (siehe Kapitel 8.4) eingesetzt werden. Der prinzipielle Ablauf kann der Abbildung 8.6 entnommen werden. Zu Beginn wird der Entwurfsraum mit einer Anzahl von Experimenten oder Stützstellen abgetastet. Dazu können Strategien (*Design of Experiments – DoE*), wie *Latin Hypercube*

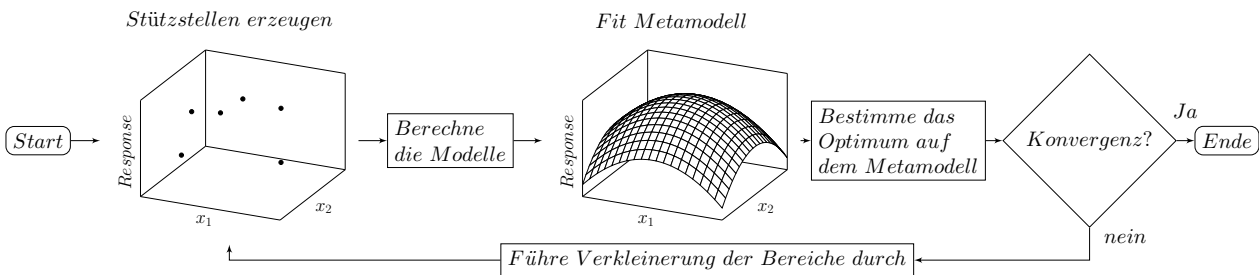


Abbildung 8.6: Zeigt den Ablauf eines *Response Surface* Optimierungsverfahrens mit Bereichs verkleinerung (*domain reduction*)

Sample, *Box-Behnken* oder *Central Composite Design* usw. eingesetzt werden. Die Entscheidung für eine *DoE* Strategie fällt beispielsweise in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Zeit und dadurch einhergehenden Beschränkung in der Anzahl an Simulationen. Im Anschluss werden die Ergebnisse dieser Stützstellen erzeugt und mittels Regression Metamodelle gebildet. Die Strategie des *Latin Hypercube Sample* bietet dabei einen Vorteil in der variablen Anzahl an Versuchen. Das Optimum kann mittels Verfahren, wie gradientenbasierten oder auch Evolutionären Algorithmen abhängig von der Art des Metamodells ermittelt werden. Das gefundene metamodellbasierte Optimum kann im Anschluss erneut nachgerechnet werden. Das Verfahren kann für die Optimierung crashrelevanter Komponenten bei beispielsweise Parameteroptimierungen (bsp. Wandstärkenoptimierung) eingesetzt werden.

Aus Stander und Craig, 2002 und dem *LS-OPT – Theory Manual v.7.0* geht eine Strategie zur Verkleinerung des Bereichs oder Gebiets (*domain reduction*) für simulationsbasierte Optimierung hervor. Eine der Vorteile des Verfahrens ist die variable Anzahl an Funkti-

onsaufrufen und auch eine variable bzw. obere Grenze von Iterationen. Dazu können die Strategien und Vorgehensweisen innerhalb eines *RSM*-Verfahrens variieren. Grundsätzlich werden aber verschiedene Antwortflächen für Ziel- und Restriktionsverhalten erzeugt. Bei dem *SRSM*-Verfahren wird mit Teilmengen der Antwortflächen als Region von besonderem Interesse gearbeitet. Außerdem existiert eine gewisse Dynamik, bei der die Teilregionen durch den Entwurfsraum verschoben bzw. vergrößert oder verkleinert werden (Kontraktion). Das neu ermittelte Optimum auf Basis des Metamodells bildet ein neues Zentrum für eine Region, die erneut untersucht werden soll. Für den Startpunkt $x^{(0)}$ als Zentrum für die erste Region werden *lower* und *upper Bound* mit einer spezifischen Reichweite $r^{(0)}$ für die Intervalle ermittelt:

$$x_i^{rL,0} = x_i^{(0)} - 0.5r_i^{(0)} ; \quad x_i^{rU,0} = x_i^{(0)} + 0.5r_i^{(0)} \quad \text{und} \quad i \in \{1, \dots, n\} \quad (8.7)$$

Dazu ist n die Anzahl an Entwurfsvariablen, $x_i^{rL,0}$ und $x_i^{rU,0}$ sind die unteren und oberen Grenzen. Weiterhin werden über die Werte

$$c_i^{(k)} = d_i^{(k)} d_i^{(k-1)} ; \quad d_i^{(k)} = 2 \frac{\Delta x_i^{(k)}}{r_i^{(k)}} ; \quad \Delta x_i^{(k)} = x_i^{(k)} - x_i^{(k-1)} \quad \text{und} \quad d_i^{(k)} \in \{-1 : 1\} \quad (8.8)$$

und mit der Vorzeichenfunktion die Vergrößerung und Verkleinerung erreicht und der Wert liegt im Bereich $\hat{c} \in \{-1 : 1\}$:

$$\hat{c} = \sqrt{|c|} \text{sign}(c) \quad (8.9)$$

Dann kann der Wert zur Kontraktion γ („Zusammenziehen“) der Region ermittelt werden:

$$\gamma = \frac{\gamma_{pan}(1 + \hat{c}) + \gamma_{osc}(1 - \hat{c})}{2} \quad (8.10)$$

Der Parameter γ_{pan} ist für die Verschiebung zuständig und γ_{osc} für die Verkleinerung oder Vergrößerung der Region. Die Auflösung wird in Abhängigkeit der Nähe zum optimalen Wert aus der vergangenen Iteration gewählt. Je kleiner der Abstand zwischen dem Ausgangsentwurf und dem neuen optimalen Entwurf ist, desto kleiner wird die neue Region. Dazu wird eine Intervalllänge (*range*) ermittelt. Die Rate λ für jede Entwurfsvariable i wird wie folgt ermittelt:

$$\lambda_i = \eta + |d_i^{(k)}|(\gamma - \eta) \quad (8.11)$$

um dann im Anschluss die *range* r_i^{k+1} zu erhalten:

$$r_i^{k+1} = \gamma_i r_i^{(k)} \quad (8.12)$$

Das *Panning* und *Zooming* ist in Abbildung 8.7 dargestellt. Für die Optimierung auf Basis von Metamodellen kann von verschiedenen Startpunkten aus gestartet werden. Die Ermittlung von Metamodell-basierten Funktionsaufrufen geschieht deutlich schneller.

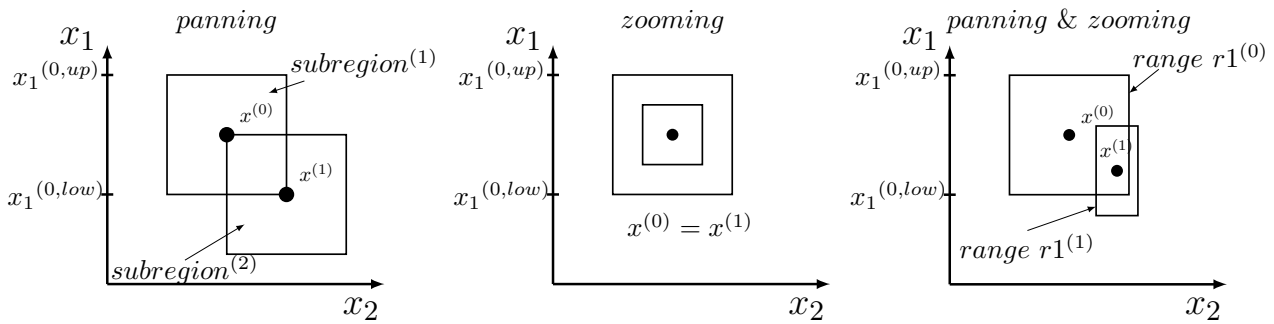


Abbildung 8.7: Zeigt das *panning* (links); *zooming* (mitte) und die Kombination aus *panning* & *zooming* (rechts), skizziert nach Stander und Craig, 2002

8.6 Software Schnittstellen im Prozess

Das Verfahren ist in einer geschlossenen Java-Anwendung entwickelt, bestehend aus mehreren Klassen. Zur praktischen Durchführungen sind einige Schnittstellen erzeugt worden. Optional können einige Einstellungen, wie Limitierung von Ressourcen, geometrische Restriktionen oder Pfade zur externen Programmen über eine Konfigurationsdatei geändert werden. Die Anwendung erzeugt die Geometrie im *STL*-Format automatisiert. Für ein Finite-Elemente Modell wird der Präprozessor HyperMesh verwendet. Das Programm wird zur Vernetzung der Geometrie für verschiedene Rechensolver eingesetzt. Zur Berechnung der Simulationsmodelle wurden Schnittstellen zu den kommerziellen Finite-Elemente Solvern LS-DYNA, RADIOSS und Pamcrash implementiert. Das beinhaltet die Übergabe von Verbindungsmodellierung bei Verbindungsknoten, Generierung von Set-Daten für Anbindungsstellen und die Verarbeitung bzw. Extraktion der Simulationsdaten aus den entsprechenden Dateiformaten. In der inneren Optimierungsschleife werden Optimierungsalgorithmen von LS-OPT v. 7.0.1 verwendet. Grundsätzlich findet das *SRS*M-Verfahren Anwendung und die Abtastung geschieht mittels *Latin Hypercube Sample*. Der Austausch und die Variabilität wird mittels XML-File realisiert. Für umfangreichere Auswertungen der Ergebnisse (*Responses*) aus den Solvern können auch Skripte von *Animator4 - GNS mbH* eingesetzt werden. Zur automatisierten Generierung von Graphenbilder oder Plots werden \LaTeX und *PGF/TikZ* verwendet. Zur Steuerung der Optimierungsabläufe und Parametereinstellung wird eine ASCII basierte Konfigurationsdatei verwendet. Die Anwendung kann unter Windows und Linux ausgeführt werden. Der Ablauf ist für die Ausführung auf HPC-Cluster entworfen und lässt die parallele Berechnung von verschiedenen Entwürfen innerhalb einer Iteration zu. Die einzelnen Optimierungsprobleme in der inneren Optimierungsschleife je Entwurf können parallel ausgeführt werden. Je nach vorhandenen Ressourcen, lässt sich die Parallelität über ein CPU Anzahl-Limit beschränken. Bei der Erzeugung von größeren Rahmenstrukturen hat sich die parallelisierte Auslagerung des Vernetzungsprogramms auf das HPC-Clustern als hilfreich erwiesen. Dadurch lassen sich die Modelle ebenfalls effizient erzeugen. Eine Übersicht über die Schnittstellenverteilung findet sich in Abbildung 8.8.

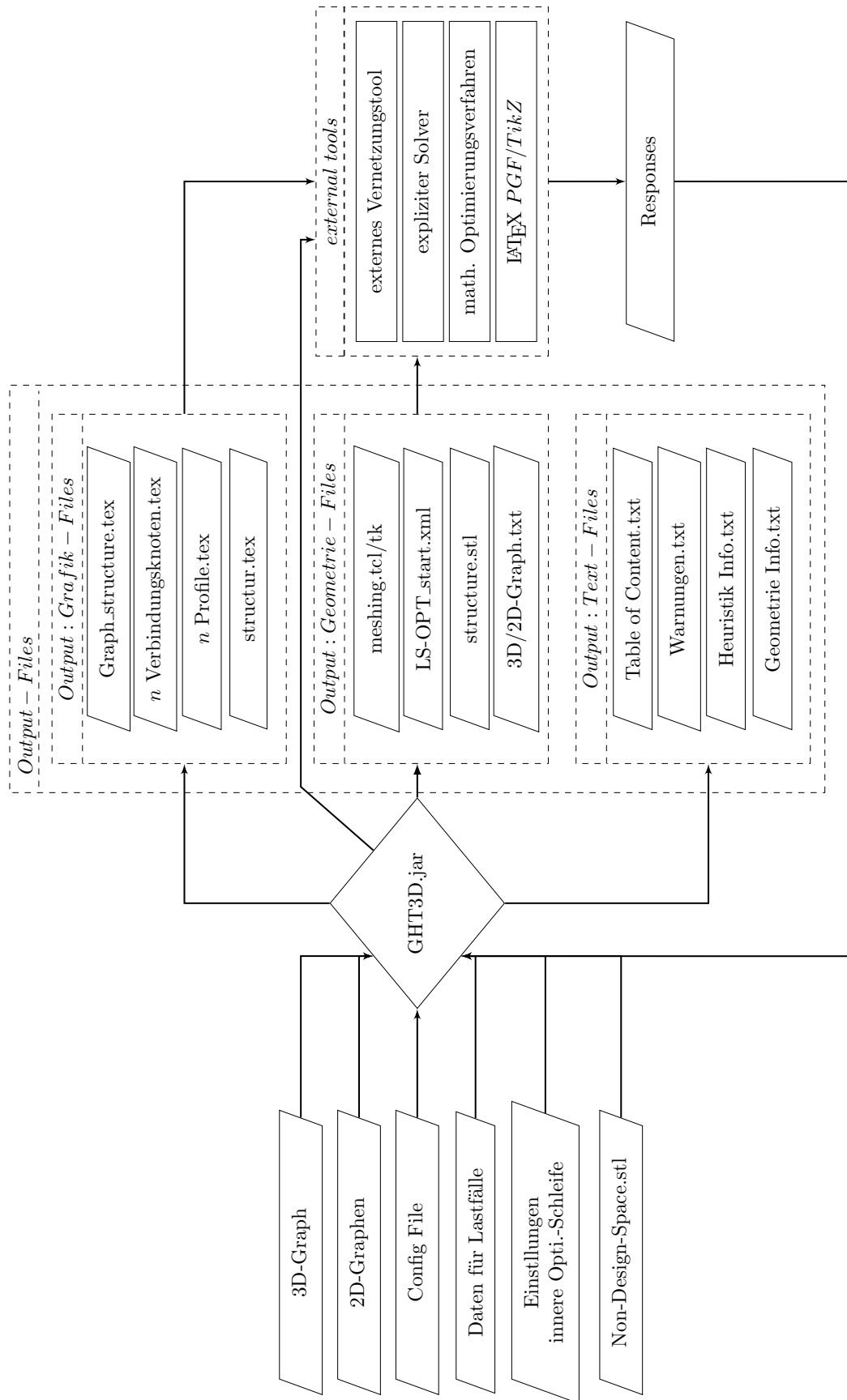


Abbildung 8.8: Übersicht über den Schnittstellenablauf verschiedener Files

9 Praktische Anwendung und Demonstration der methodischen Prinzipien

In diesem Kapitel wird auf Beispiele zur Demonstration der Leistungsfähigkeit bzw. der methodischen Vorgehensweise eingegangen. Die Beispiele reichen von mechanischen Fragestellungen akademischer Natur, bis hin zu Ansätzen zur Layout Findung mit realeren Anforderungen.

Zu Beginn werden kleine Rahmenstrukturen als überschaubare Fälle herangezogen, um die Plausibilität der Ergebnisse zu prüfen. In der inneren Optimierungsschleife wird das Verhältnis zwischen Wandstärke der Verbindungsknoten zu Wandstärke der Profile eindimensional betrachtet und Massenerhalt eingestellt. Im zweiten Beispiel findet für einen geänderten Lastfall eine Gegenüberstellung zwischen Minimierung der Kontaktkraft und Minimierung der Masse statt. Dabei trifft ein starrer Pfahl auf eine Würfelrahmenstruktur, die auf einer ebenen Fläche platziert wird.

Im Anschluss wird die Struktur als *Inlay*-Struktur in eine Crash-Box eingesetzt und mit einer starren Wand zusammengedrückt. Als Ziel wird die Kontaktkraft minimiert und das Szenario für verschiedene Bauraumlängen ausgeführt.

Im letzten Beispiel wird die GHT3D zur Layout Findung im Bereich des Vorderwagens hinter dem Stoßfänger für ein Fahrzeug als Skelettstruktur eingesetzt. Der Ablauf wird mit fünf Lastfällen durchgeführt. Drei dynamischen Crashlastfälle werden mit Dehnratenabhängigkeiten, Plastizität und Versagen simuliert. Außerdem sind zwei statisch implizite Berechnungen mit linear elastischem Materialverhalten im Optimierungsloop integriert.

In den Beispielen findet eine heuristisch basierte Manipulation der Topologie, sowie Form- und Wandstärkenoptimierungen mittels *SRSM*-Verfahren statt. Die verschiedenen Szenarien zeigen den vielfältigen Bedarf an unterschiedlichen Strategien deutlich auf.

Die Simulationsmodelle werden mit LS-DYNA R12 explizit/implizit berechnet und wenn nicht anders beschrieben, wird das Materialmodell *MAT 24* mit der Materialkarte aus Ortman, 2015 verwendet, siehe Anhang 1. Die Modelle werden mit Schalen-Elementen vernetzt und dazu *SurfaceToSurface*-Kontaktdefinitionen genutzt. Die innere Optimierungsschleife wird mit dem *SRSM*-Verfahren aus LS-OPT für die Evaluation der einzelnen Entwürfe ausgeführt. Als Metamodelle werden Radial Basis Funktionen verwendet. Die Berechnungen erfolgten mit AMD EPYC 7452 32-Core Prozessoren des HPC-Clusters *Pleiades* der Bergischen Universität Wuppertal.

9.1 Minimiere die Verschiebung – unter Biegung belasteter Rahmen

Das erste Beispiel (siehe Abb. 9.1) zeigt einen auf Biegung belasteten Rahmen und ist an den zweidimensionalen Rahmen aus Ortmann, 2015 angelehnt. Dabei handelt es sich um ein akademisches Beispiel zur Überprüfung von Plausibilität. Die Ergebnisse sollen möglichst struktursteif für den ausgewählten Lastfall sein. Der Rahmen wird von einem starren Pfahl von der unteren Seite getroffen. Die initiale Geschwindigkeit des Impaktors wird mit $10 \frac{m}{s}$ bei einer Masse von 9 kg festgelegt. Die Skizze zeigt die Zuordnung von quadratischen Profilquerschnitten, die zu Beginn definiert werden. Der Rahmen ist im hinteren Bereich fest eingespannt, dazu werden die 6 Freiheitsgrade an der Rückseite der Verbindungsknoten gesperrt. Die *Edges* werden in den Verbindungsknoten mittels *offset* versenkt bzw. eingesteckt. Die überlappenden Stellen sind mit *Tied*-Kontaktformulierungen aus LS-DYNA fest verbunden. Die Simulationszeit ist auf 0.020 s beschränkt und in dieser Zeit wird eine initiale Verschiebung von 150.81 mm ermittelt. Die Aufgabenstellung wird so formuliert, dass neue Entwürfe

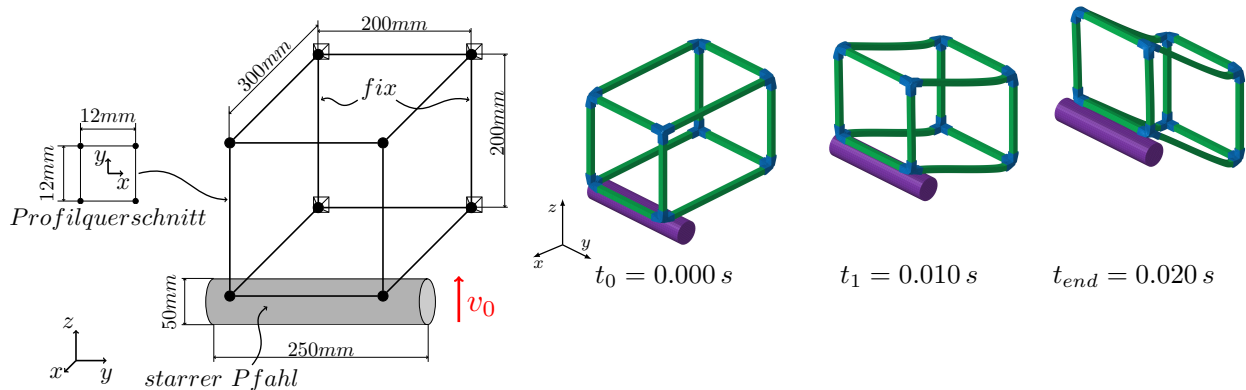


Abbildung 9.1: Skizze des Lastfalls – unter Biegung belasteter Rahmen (links), Deformationsverhalten in Ausschnitten (rechts)

verfolgt werden, die mit einer gegebenen Masse möglichst geringe Verschiebungen aufweisen. Für die Auswertung wird die Verschiebung am Schwerpunkt des Pfahls ausgewertet und als Ziel minimiert. Der Rahmen wird im Laufe des Optimierungsprozesses in der Form, der Topologie und im Bereich der Wandstärken manipuliert. Das Optimierungsziel und die verwendeten Restriktionen können aus Tabelle 9.1 entnommen werden. Die Massenrestriktion beläuft sich auf 600 g und zur Komplexitätsreduktion erfolgt eine Symmetriebedingung zur XZ -Ebene.

Tabelle 9.1: Ziel und Restriktionen – Unter Biegung belasteter Rahmen, mit einer Massenrestriktion von 600 g

Ziel	Restriktionen
Minimiere die Verschiebung (gemessen am Schwerpunkt des Pfahls)	Masse Rahmen = 600 g Verbindungswinkel $\geq 15^\circ$ Symmetrie $XZ - Ebene$ Minimale <i>Edge</i> -Länge 35 mm Minimale Wandstärke 0.8 mm Maximale Wandstärke 3 mm

Die Optimierungsstrategie wird zu Beginn definiert. Der Prozess startet mit einer Formoptimierung und im Anschluss wird der beste Entwurf weiter durch heuristikbasierte Graphenmanipulationen automatisiert optimiert. Für die Formoptimierung werden die Koordinaten der vorderen Vertices freigegeben. Insgesamt werden in der Formoptimierung 600 Funktions-

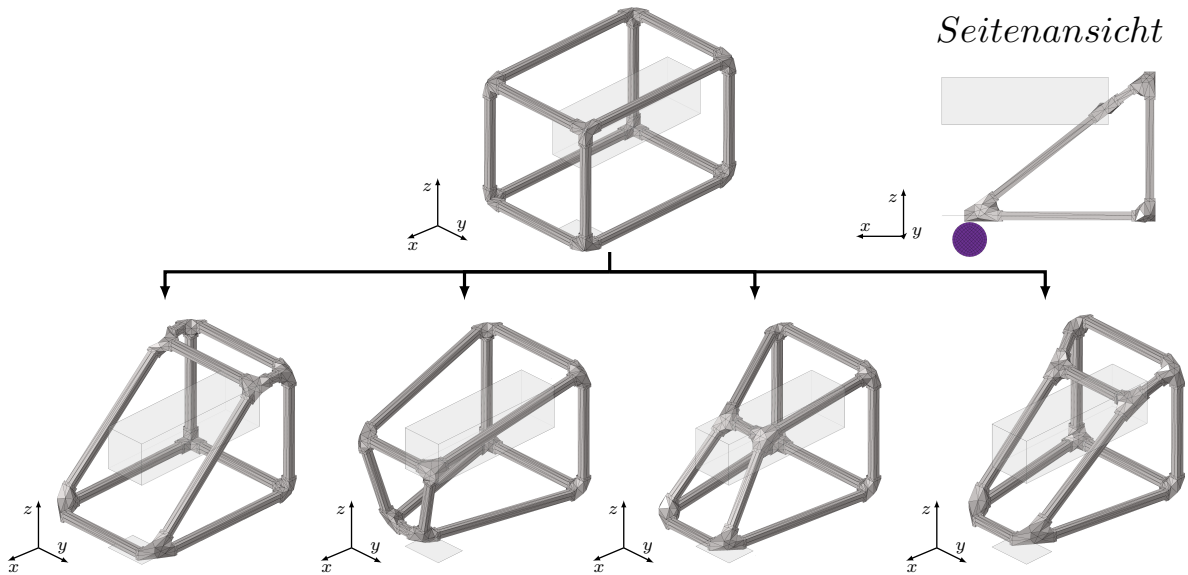


Abbildung 9.2: Designräume, symmetrisch - Ausgangsgeometrie (oben), Vier Entwürfe aus DoE Sample aus SRSM (unten), Bester Entwurf aus Formoptimierung innerhalb von 600 Funktionsaufrufen (unten rechts), triangulierte Struktur

aufrufe berechnet (30 Stützstellen über 20 Iterationen). Ein Auszug mit 4 Entwürfen aus der Formoptimierung mit gleicher Masse ist in Abbildung 9.2 unten gezeigt.

Der finale Entwurf aus der Formoptimierung befindet sich ganz rechts, dargestellt mit Seitenansicht. Demnach wird die Anzahl an Formvariablen durch Symmetrie um die Hälfte reduziert und im hinteren Bereich durch die Einspannungen lastfallgerecht durch das *Keyword Fix* weiter eingeschränkt. Im Anschluss wird die Geometrie mit dem besten Entwurf weiter topologisch durch die Heuristiken manipuliert, um so weitere Verbesserungen zu erzielen. Abbildung 9.3 zeigt einen Ausschnitt von den simultan berechneten Entwürfen je

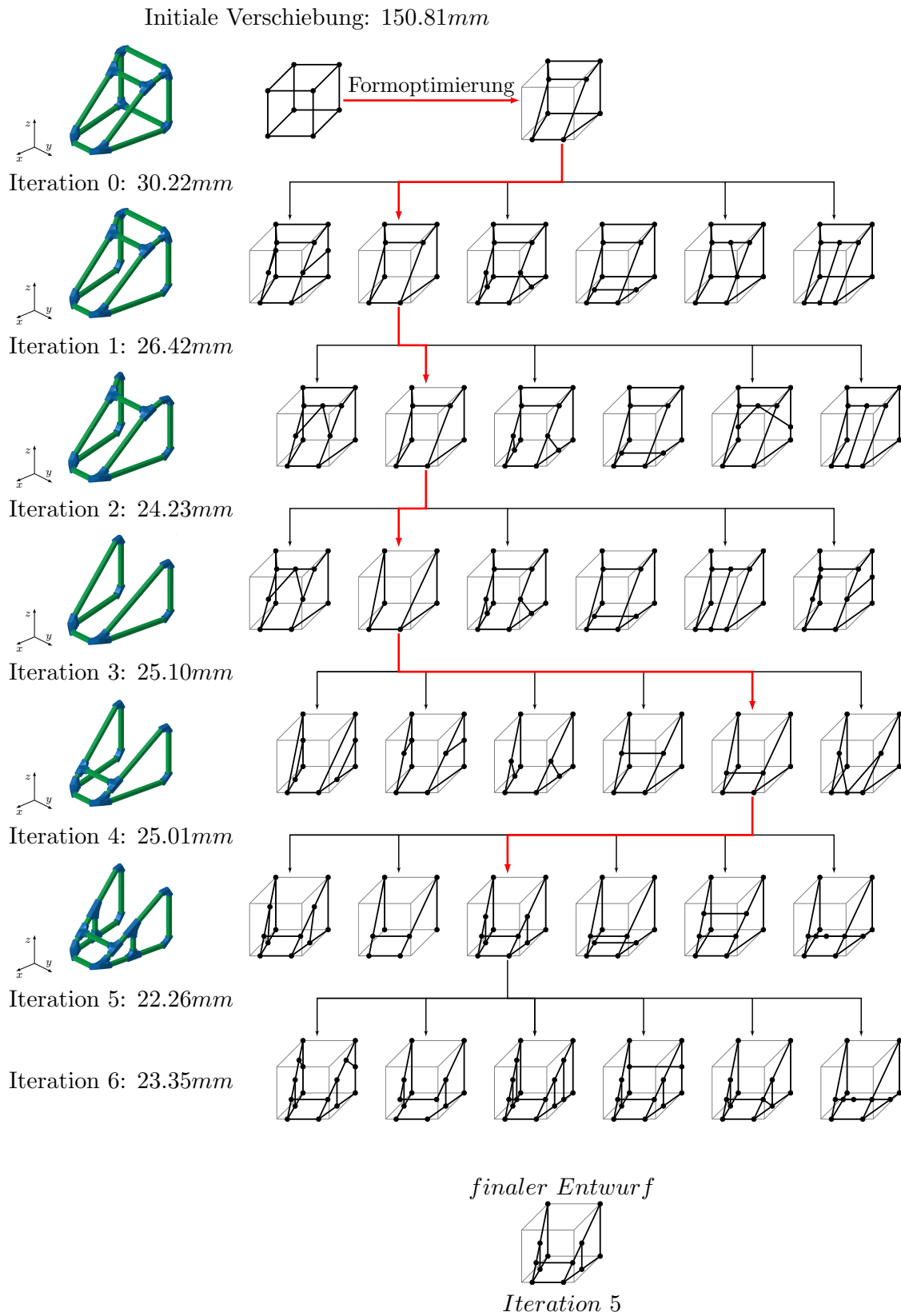


Abbildung 9.3: Ausschnitt aus den Entwürfen bis zum finalen Entwurf – Ab Iteration 6 steigt der Verschiebungswert bei Entwürfen mit zusätzlichen *Edges* wieder an

Iteration auf Basis der Heuristiken. Nur symmetrische Entwürfe werden in der topologischen Graphenmanipulation zugelassen. Diese Einschränkungen führen maßgeblich durch Komplexitätsreduktion zu besseren Entwürfen. Aus der Formoptimierung sind einige Änderungen ersichtlich, die eine Reduzierung der Verschiebung begünstigen. Die äußere Form hat einen erhöhten Einfluss auf diesen Biegelastfall und die Verschiebung des Pfahls wird auf 30.22 mm reduziert. Zur Einschränkung der Entwürfe wird mittels Formrestriktion die kleinere Schnittmenge aus Formvariablen und kartesisch ausgerichteten Designspace nach Vorgabe bestimmt. Als Folge werden keine zu kurzen Strukturen berechnet, denn hier würde der Pfahl die Struktur gar verfehlen. Daraus folgt, dass nur Entwürfe entstehen, die auch einen Einfluss auf die Verschiebung des Pfahls haben. Die Entwurfsräume sind mit den grauen Quadern dargestellt. Im Ergebnis der Formoptimierung wird der Rahmen im Bereich des Einschlagorts schmaler und es stellt sich eine dreieckartige äußere Form ein. Für den Vergleich zwischen den Entwürfen und zur Einschränkung der Masse wird eine Massenrestriktion definiert. Dazu wird die Annahme verfolgt, dass bei Steifigkeitsproblemen grundsätzlich die maximal zur Verfügung stehenden Masse genutzt werden sollte. Die Verkürzung der *Edges* hat verbesserte Struktureigenschaften zur Folge, denn durch den Massenerhalt steigt die Wandstärke und generiert weitere Struktursteifigkeit. Der Rahmen selbst wurde global so verkürzt, dass sicher der Einschlagsort am äußersten Punkt befindetet. Als Folge setzt sich eine weitere Reduzierung der Verschiebung ein. Tabelle 9.2 zeigt eine Übersicht über den Verlauf der Verschiebung, Anzahl an Entwürfe und den Umfang an Funktionsaufrufen. Die Tabelle zeigt auch die Verschiebung direkt in der Abfolge zum finalen Entwurf.

Tabelle 9.2: Ziel- und Restriktionswerte des unter Biegung belasteten Rahmens 600 g , Übersicht über die Entwürfe zum finalen Design in Iteration 5

	Verschiebung	Masse	n Entwürfe	Funktionsaufrufe
initialer Entwurf	150.81 mm	599.50 g	1	1
Iteration 0 Formopt.	30.22 mm	599.20 g	1	600
Iteration 1 heurist. Manip.	26.42 mm	599.30 g	7	63
Iteration 2 heurist. Manip.	24.23 mm	599.10 g	32	288
Iteration 3 heurist. Manip.	25.10 mm	599.50 g	31	279
Iteration 4 heurist. Manip.	25.01 mm	599.30 g	21	189
Iteration 5 heurist. Manip.	22.26 mm	599.20 g	33	297
Iteration 6 heurist. Manip.	23.35 mm	598.90 g	34	306

Der Einzug eines neuen Strukturelements hat eine globale Wandstärkenreduktion zur Folge. Durch die Reduzierung der Wandstärke, tritt in Folge dessen eine Reduzierung der Steifigkeit auf. Das bedeutet in diesem Zusammenhang, dass eine neu eingezogene Strebe diesen Steifigkeitsverlust kompensieren muss und zusätzlich noch eine erfolgreiche Verbesserung der Struktursteifigkeit für das Optimierungsziel im Ergebnis der Gesamtstruktureigenschaften generieren soll. Dieser Sachverhalt legt nahe, dass die Strukturen im hinteren Bereich bei

den Einspannungen entfernt werden können und die Masse auf die Wandstärke umgelegt werden kann. In der inneren Optimierungsschleife werden 8 Funktionsaufrufe in einer ersten Iteration zur Wandstärkenevaluation verwendet. Das SRSM-Verfahren lässt einen weiteren metamodellbasierten Punkt zur erneuten Berechnung in Iteration 2 zu. Außerdem wird für die Wandstärke ein eindimensionales Verhältnis zur Wandstärkenverteilung zwischen der Wandstärke der *Edges* zu der Wandstärke der *Verbindungsknoten* verwendet. Abbildung 9.4 zeigt beispielhaft den Zusammenhang zwischen dem definierten Wandstärkenverhältnis und der Verschiebung des Pfahls anhand von zwei Entwürfen. In den Abbildungen ist der Einfluss ersichtlich.

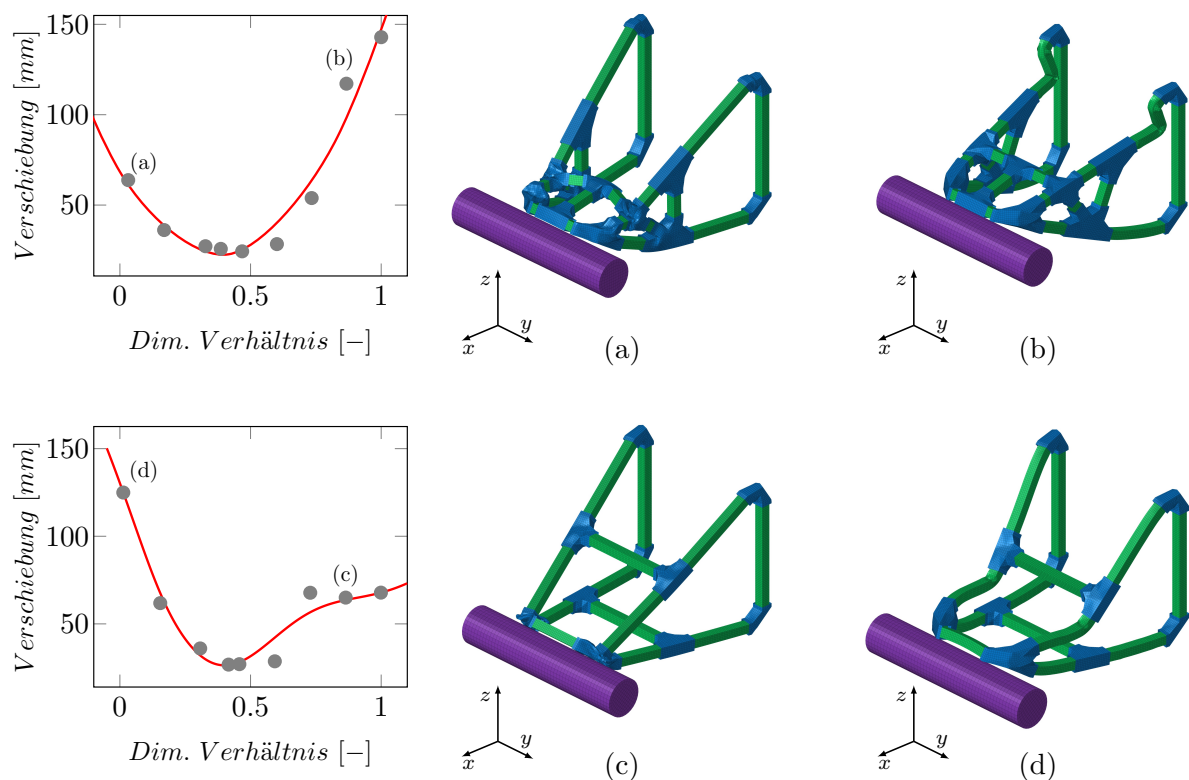


Abbildung 9.4: Verhältnis der Wandstärke zwischen *Vertices* und *Edges* anhand von zwei Beispielen: Verbindungsknoten mit geringerer Wandstärke (a) und (c) *Edges* mit geringerer Wandstärke (b) und (d)

Im Ergebnis können so zwei verschiedene Wandstärken verteilt werden und dennoch wenig Funktionsaufrufe durch eine Reduktion auf einen eindimensionalen Fall eingesetzt werden. Die Massenrestriktion ermöglicht diesen Schritt und erzeugt dazu die nötige Komplexitätsreduktion in der inneren Schleife, denn nach Verteilung des Verhältnisses wird die Wandstärke auf das passende Massenniveau heraufgesetzt oder herabgesenkt. Im Grunde wird damit das Ziel verfolgt, dass sich die Wandstärke am Einschlagsort und an den Einspannungen im Vergleich zur restlichen Struktur erhöhen soll, um starke lokale Deformationen zu vermeiden, die bei dem Pfahlaufprall entstehen können. Im Extremfall geben die Strukturknoten am Einschlagsort stark nach oder entsprechend entgegengesetzt, die Streben verbiegen sich.

Liegt das Verhältnis bei 0, erhalten die Verbindungsknoten die kleinste mögliche Wandstärke und die Profile die höchst mögliche Wandstärke und bei 1 entsprechend umgekehrt. Ein geeignetes Verhältnis liegt dennoch im mittleren Parametersegment. Die Wandstärkenoptimierung erzeugt tendenziell eine Verteilung der Wandstärke von Profil zu Verbindungsknoten von 40:60 oder 60:40. Eine starke Abweichung konnte hierbei nicht verzeichnet werden. Eine pauschale Aussage ist in diesem Kontext nicht möglich, die Verteilung hängt stets von der Situation bzw. von der Topologie ab. Die Randbereiche sollten demnach eingeschränkt werden, da die Extremfälle nicht von Interesse sind. Der beste Entwurf stellt sich in Iteration 5 ein, siehe Abbildung 9.5.

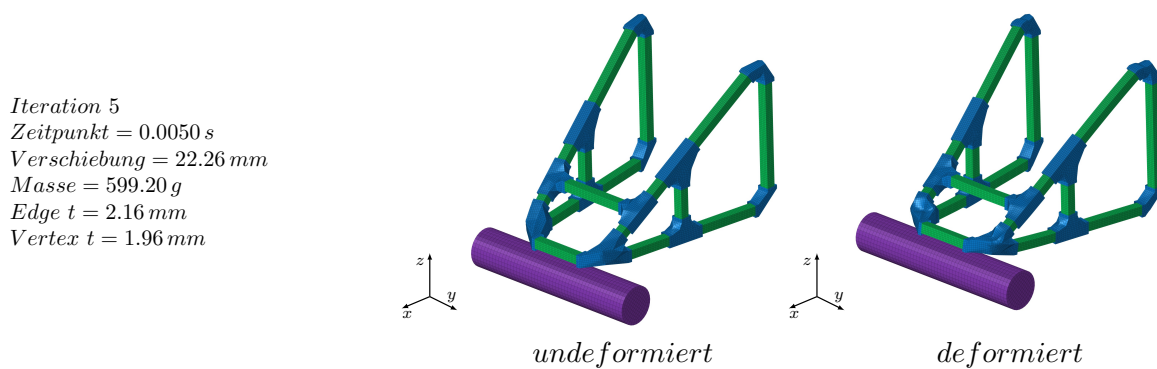


Abbildung 9.5: Finaler Entwurf initial und deformiert – Optimierungsversuch mit einer Massenrestriktion von 600 g

In Abbildung 9.6 sind vier weitere parallele Entwürfe dargestellt. Ein Vorteil der GHT ist die Generierung von verschiedenen Entwürfen auf ähnlichem Niveau. In diesen Beispielen ist ebenfalls ersichtlich, dass sich unterschiedliche Wandstärkenverhältnisse einstellen. Grundsätzlich entstehen aus den kombinierten Vorschlägen im selektiven Prozess plausible Entwürfe.

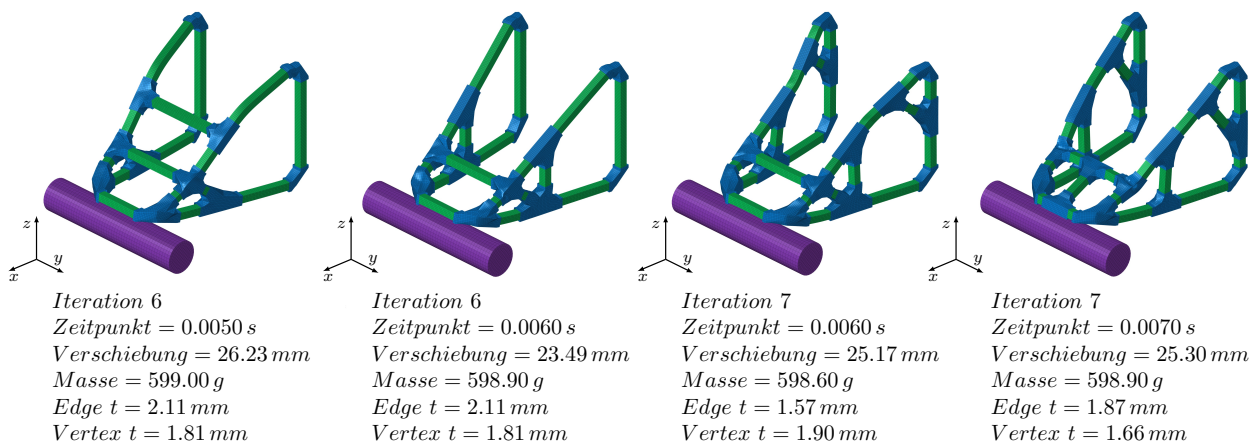


Abbildung 9.6: Parallele Entwürfe, deformiert – Optimierungsversuch mit einer Massenrestriktion von 600 g

9.1.1 Parameteränderung der Massenrestriktion

Im Folgenden werden drei Ergebnisse aus weiteren Optimierungsdurchläufe gestartet. Als Änderung wird die Massenrestriktion je um 50 g schrittweise reduziert. Die Änderung der Massenrestriktion zeigt dabei unterschiedliche Ergebnisse (siehe Abb. 9.7). Dazu wurde jeweils zu Beginn die Formoptimierung mit 600 Funktionsaufrufen beibehalten. In dieser

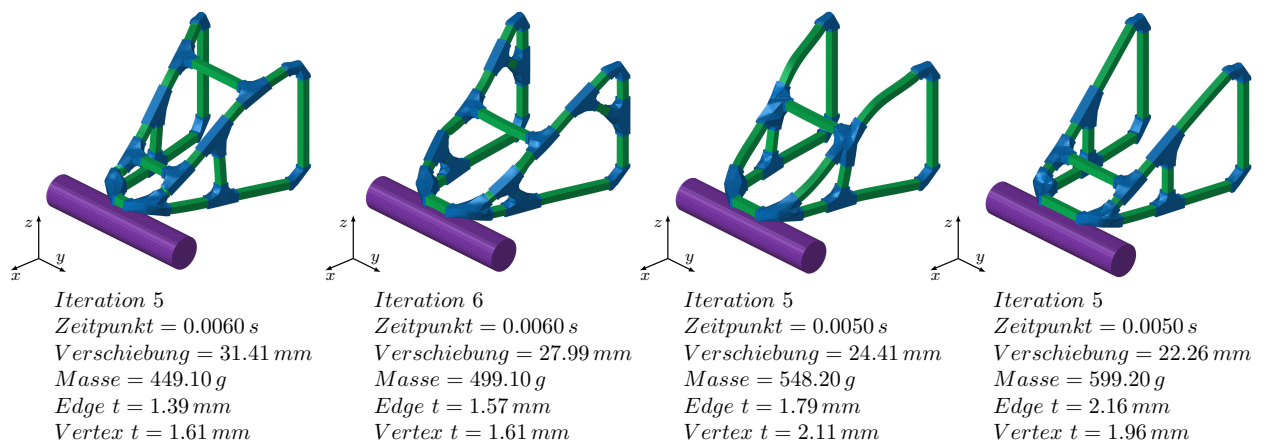


Abbildung 9.7: Entwürfe als Ergebnis aus vier Optimierungsstarts mit geänderter Massenrestriktion des biegebelasteten Rahmenmodells, deformiert – 450 g, 500 g, 550 g und 600 g

Testreihe wird ersichtlich, dass je weniger Masse zur Verfügung steht, desto schmäler wird die Ausführung im vorderen Bereich des Einschlagsorts. Insgesamt steigt mit reduzierter Masse das Niveau der Verschiebung der Entwürfe. Eine Tendenz für ein geeignetes Wandstärkenverhältnis ist nicht ersichtlich. Grundsätzlich erzeugt das Verfahren mit Änderung der Massenrestriktion nachvollziehbare Lösungen.

9.1.2 Prozessunsicherheit

Der Prozess zur Erzeugung des Finite-Elemente Modells unterliegt einer Prozessunsicherheit mit Einfluss auf das finale Ergebnis des Optimierungsdurchlaufs. Abbildung 9.8 zeigt die nominalen Unterschiede bei der Verschiebung des Pfahls mit 50 Prozessstarts bei gleichem Ausgangsgraph. Die bewertbaren Ergebnisse der Finite-Elemente Simulation variiert in dieser Menge mit einer Toleranz von 0.984 mm. Bei dem Modell handelt es sich um die Variante mit einer Strukturmasse von 550 g und *perturbation* ist nicht vorhanden. Die Simulationsergebnisse lassen sich zwar als ähnlich oder auf gleichem Niveau einordnen, doch hat diese Differenz einen Einfluss auf die Entwicklung der Entwürfe durch die Iterationen. Durch verschiedenes Starten der Optimierungsprozesse, lassen sich unterschiedliche geometrische Modelle im besten Entwurf als Ergebnis erzeugen. Das hängt damit zusammen, dass sich zwischen manchen Entwürfen aus zwei aufeinanderfolgenden Iterationen eine Verbesserung von beispielsweise $< 0.2\text{ mm}$ im Zielfunktionswert einstellt. Auch innerhalb einer Iteration wird die Reihenfolge im *Ranking* beeinflusst. Die Unterschiede lassen sich durch

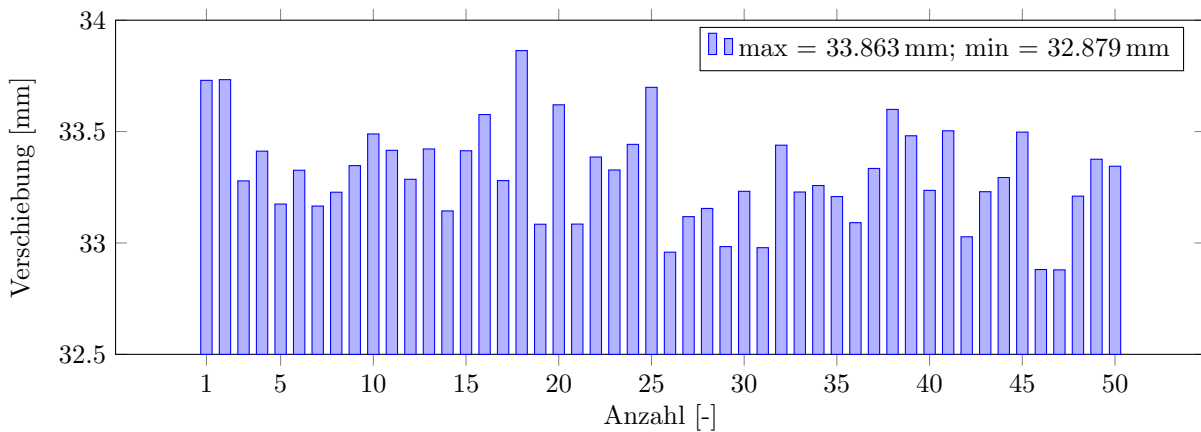


Abbildung 9.8: Nominale Streueung der maximalen Verschiebung des Pfahls bei wenigen 50 Programmstarts – Deformation des Punktes im oberen Bereich und im unteren Bereich

die unterschiedliche Diskretisierung im Finite-Elemente Netz als einen Einfluss beschreiben. Die Verbindungsknoten erhalten unterschiedliche Anordnungen der Finite-Elemente bei jeder Vernetzung. Zusätzlich stellen die Verbindungsknoten in diesem Beispiel die Lasteinleitung. Der Effekt äußert sich in einer variierenden Reihenfolge von besten Entwürfen von unterschiedlichen Heuristiken innerhalb einer Iteration. In höheren Iterationen führt dies dann zu geänderten Entwürfen im Ergebnis. Mal führt das Löschen einer *Edge* zu einem besseren Ergebnis in den ersten Iterationen, als im Vergleich zur Erzeugung eines neuen Profils und anders herum. Eine auffällige Variation von Strukturmassen, die bei gleichbleibenden Wandstärken resultieren könnte, konnte in diesem Zusammenhang mit einer Menge von 50 Prozessstarts nicht ermittelt werden. Lediglich durch die diskrete Wandstärkenevaluation innerhalb der inneren Optimierungsschleife selbst können Variationen eintreten, durch eine unterschiedliche Position von Stützstellen im Entwurfsraum. Außerdem trat keine einflussreiche Variation der Finite-Elemente Simulation bei gleichem Finite-Elemente Netz auf. Die Reduzierung dieses Einflusses kann ggf. durch eine andere Bestimmung von Zielwerten erfolgen. Falls die Abweichung bei mehrfachem Neustart größer ausfällt, als die Differenzen der Zielfunktionswerte zwischen den Iterationen und innerhalb, sollte zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der Heuristiken die Unsicherheit des Prozesses berücksichtigt werden.

9.2 Starrer Pfahl trifft Rahmenstruktur mittig

Das Szenario setzt den Fokus auf Beschleunigungswerte bzw. auf die Art der Verzögerung des Impaktors. Die Betrachtung von Beschleunigungen im Bereich von Ziel- oder Restriktionsfunktion im Optimierungsdurchlauf wird als komplexer eingeschätzt, als im Vergleich zur Reduktion von kleinen Verschiebungen. Der Deformationsweg ist in diesen Beispielen deutlich länger und ist Teil des Ziels bzw. steht in direkter Abhängigkeit zum Ziel. Außerdem sollte der zur Verfügung stehende Deformationsweg stets im vollen Umfang genutzt werden.

Bei längeren Deformationswegen treten deutlich mehr deformationsbasierte und aufeinander aufbauende Events auf, als im Vergleich zu Deformationen mit sehr geringen Verschiebungen. Das beinhaltet mehr Wechselwirkungen zwischen Komponenten und grundsätzlich übt auch geschwindigkeitsabhängiges Deformationsverhalten einen Einfluss aus. Der verwendete Rahmen besitzt die Maße von $180 \times 180 \times 180 \text{ mm}$ im Bereich der *Vertices* und wird von einem starren Pfahl oberhalb mittig getroffen. Die Querschnitte der Profile haben eine Kantenlänge von $12 \times 12 \text{ mm}$, wie im Beispiel zuvor. Abbildung 9.9 zeigt eine Skizze des Lastfalls und das dazugehörige Deformationsverhalten. Das Materialmodell beschreibt das Verhalten von

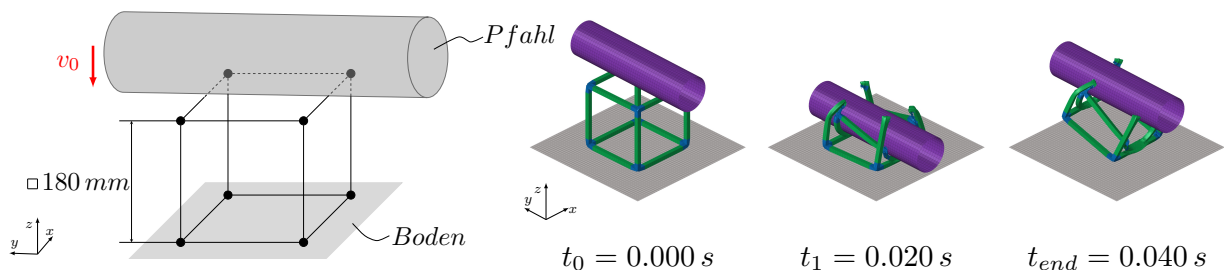


Abbildung 9.9: Skizze des Lastfalls – unter Biegung belasteter Rahmen (links), Deformationsverhalten in Ausschnitten (rechts)

Aluminium mit Versagen. Der Pfahl wiegt 100 kg und hat eine Anfangsgeschwindigkeit von $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Der Pfahl ist um 5° um die y -Achse geneigt. Im Ausgangsmodell tritt Versagen an den Verbindungsknoten auf, der Pfahl trifft auf dem Boden auf, es kommt zum Kraftpeak und der Pfahl wird zurückgeschleudert. Daraus ist ersichtlich, dass der Rahmen auf den Boden aufgelegt und nicht eingespannt ist und das Optimierungsverfahren muss mit:

- Einflussreichem Versagen
- Betrachtung von Beschleunigungswerten
- Kontakten im Bereich der Lagerung und Wegrutschen der Struktur über den Boden

umgehen können. Im Anschluss zu den Ergebnissen zur Kontaktkraftminimierung wird das Ziel zur Reduktion der Strukturmasse als Kontrast eingestellt und eine weitere Versuchsreihe optimiert.

9.2.1 Minimiere die maximale Kontaktkraft

Als Ziel soll die kinetische Energie des Impaktors vollständig von der zu optimierenden Struktur aufgenommen werden. Das Kraftniveau soll sich möglichst nah an einem rechteckigen Verlauf ausbilden. Außerdem soll eine Verschiebung nach Vorgabe nicht überschritten werden (Intrusionsrestriktion). Ein Überblick zu Ziel und Restriktionen befindet sich in Tabelle 9.3. In der ersten Versuchsreihe wird die Kontaktkraft als Ziel betrachtet. Durch die Minimierung der maximalen Kontaktkraft sollen Verzögerungswerte verbessert bzw. reduziert werden. Im GHT3D-Prozess werden die Entwürfe an jedem Ende einer Iteration nach den maximal auftretenden Kontaktkräften sortiert. Den Kontaktkräften liegen die Beschleunigungswerte

des Pfahls zugrunde. Dadurch, dass im selektiven Prozess jeweils die Strukturen mit den niedrigsten Werten in die nächste Iteration übernommen werden, bilden sich schrittweise Strukturen, mit einer niedrigeren maximalen Verzögerung aus. Der Lastfall trifft mittig auf die Struktur und dadurch kann zusätzlich eine Komplexitätsreduktion durch eine Symmetriebedingung in der $YZ - Ebene$ erfolgen. Zur Begrenzung wird ein vorgegebener Deformationsweg von 150 mm zugelassen. Die initiale Wandstärke beträgt 1 mm und die damit erzeugte Masse des Rahmens beträgt 0.27 kg . Das Verfahren soll innerhalb der Struktur neue

Tabelle 9.3: Ziel und Restriktionen – Kontaktkraftminimierung: Pohl trifft Rahmen mittig

Ziel	Restriktionen
Minimiere die max. Kontaktkraft (gemessen durch Kontaktinterface)	Verschiebung Pfahl $\leq 150\text{ mm}$ Verbindungswinkel $\geq 15^\circ$ Symmetrie $YZ - Ebene$ Minimale Wandstärke 0.8 mm Maximale Wandstärke 3 mm

mechanisch begründete Strukturelemente einziehen, um die Struktursteifigkeit zu erhöhen. Zusätzlich wird über das *SRS*M-Verfahren von LS-OPT mit 10 Funktionsaufrufen zwischen oberer und unterer Wandstärkengrenze evaluiert. Die Wandstärke wird für Verbindungsknoten und Profile einheitlich eindimensional gewählt. Aus den 10 Entwürfen, wird idealerweise der Entwurf verwendet, bei dem der starre Pfahl die niedrigsten Verzögerungswerte besitzt und noch die Restriktionsgrenze einhält. Die Restriktionsgrenze gibt somit ebenfalls indirekt ein gefordertes ideales Kraftniveau vor. Hier liegt die Annahme zugrunde, dass ein vollständig genutzter Deformationsweg stets zu den niedrigsten Kontaktkräften führt. Abbildung 9.10 zeigt die besten Entwürfe der einzelnen Iterationen, schrittweise bis zu Iteration 6 zum besten Entwurf. Dabei ist die stetige Füllung des Würfels mit bis zu zwei Strukturstreben pro Iteration ersichtlich. Die Heuristiken agieren nach den unter Kapitel 7 beschriebenen Strategien. Demnach werden besonders markanten Stellen im Deformationsbild ausgewertet und neue topologisch manipulierte Graphen erzeugt. Tabelle 9.4 zeigt eine Übersicht über den Optimierungsverlauf bis zum finalen Entwurf.

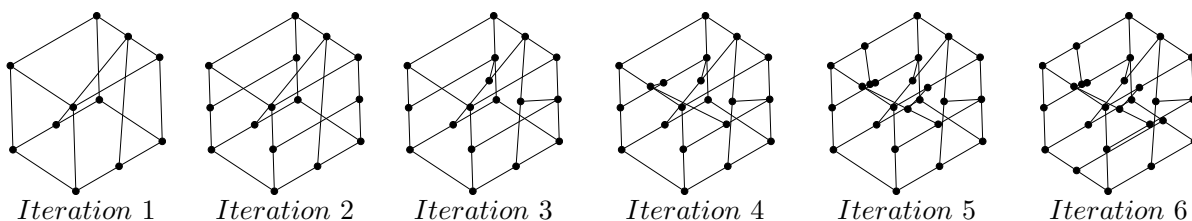


Abbildung 9.10: Graphenmanipulation von Iteration 1 bis Iteration 6 – Minimiere die Kontaktkraft bei Pfahleinschlag mit 100 kg Masse

Tabelle 9.4: Starrer Pfahl trifft Rahmenstruktur mittig – Übersicht über die Entwürfe zum finalen Design in Iteration 6. Die maximalen Kontaktkräfte sind über SAE 1000 gefiltert. Initial und in Iteration 1 schlägt der Pfahl auf dem Boden auf.

	Verschiebung	Kraft	<i>n</i> Entwürfe	Funktionsaufrufe
initialer Entwurf	$> 165 \text{ mm}$	<i>Aufschlag</i>	1	1
Iteration 1 heurist. Manip.	$> 165 \text{ mm}$	<i>Aufschlag</i>	6	6
Iteration 2 heurist. Manip.	148.30 mm	52430 N	9	90
Iteration 3 heurist. Manip.	148.85 mm	41649 N	25	250
Iteration 4 heurist. Manip.	147.01 mm	39991 N	25	250
Iteration 5 heurist. Manip.	149.40 mm	40667 N	25	250
Iteration 6 heurist. Manip.	149.72 mm	39806 N	19	190

Hier ist ersichtlich, dass im initialen Modell und in Iterationen 1 die Strukturen zu wenig Struktursteifigkeit aufweist, um den Pfahl innerhalb der geforderten Grenze zu stoppen. Ab Iteration 2 wird die Wandstärke zusätzlich evaluiert und diese steigt dann auf ca. 2.20 mm an. Die Entwürfe liegen insgesamt ab Iteration 2 sehr nah an der Restriktionsgrenze. In Iteration 6 stellt sich der finale Entwurf ein und ab Iteration 7 steigt die Kontaktkraft dann wieder weiter an. Das Ergebnis aus Iteration 6 besitzt eine Masse von 0.99 kg . Abb. 9.11 rechts zeigt den finalen Entwurf. Die belasteten Streben begünstigen im Deformationsverhalten eine glattere Kraft-Weg-Kurve. Der Kraft-Weg-Verlauf (siehe Abb. 9.11, links) zeigt ein deutlich näher am theoretischen Vergleichswert liegendes Kraftniveau auf. Außerdem ist der Kraft-Weg-Verlauf

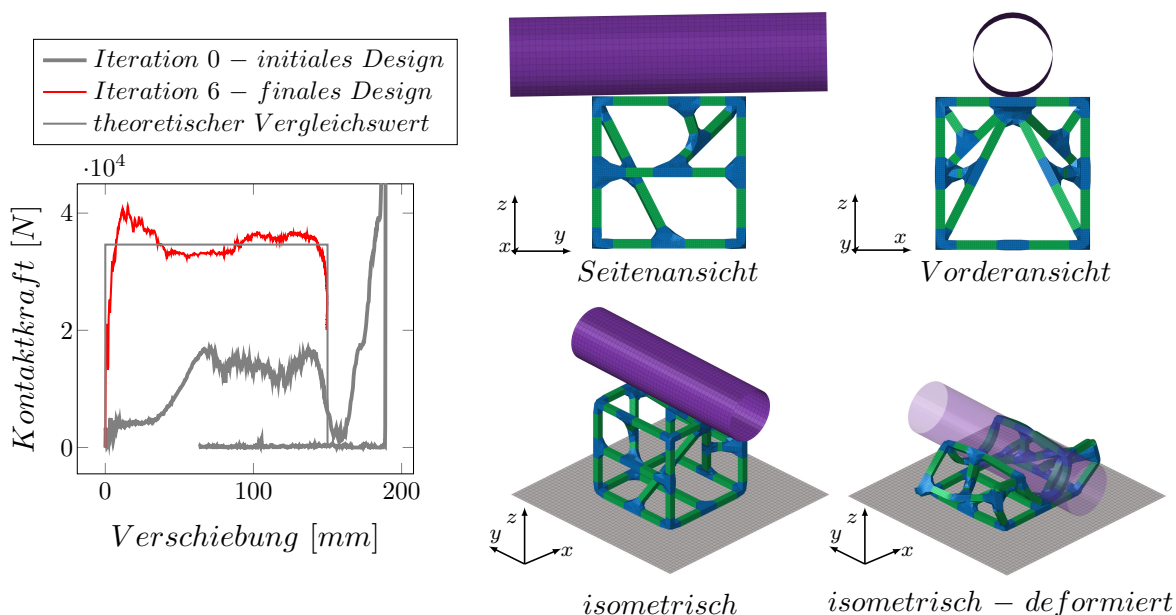


Abbildung 9.11: Kraft-Weg-Verlauf im Vergleich zwischen initialem Entwurf und finalen Entwurf, links – Finaler Entwurf mit einer Wandstärke von $1x$ aus der Kraftminimierung starrer Pfahl mit 100 kg (rechts)

des initialen Entwurfs abgebildet, bei dem der Aufprallpeak des Pfahls ersichtlich ist. Das Strukturverhalten liegt aus Sicht der Energieabsorption sehr nah an einem optimalen Verlauf. Der theoretische Vergleichswert ermittelt sich aus der aufgenommenen Energie aus dem Kraft-Weg-Verlauf dividiert mit der Verschieberestriktion. Die mittels numerischer Integration über die Trapezregel ermittelte Energie liegt bei $5194 J$. Das ideale Kraftniveau liegt mit einer vorgegebenen Verschiebung von $150 mm$ bei $34626.67 N$. Die Strukturstreben liegen von der Lage her eher quer zur Lastrichtung, um ein Deformationsverhalten senkrecht zur individuellen Achse einzuleiten. Diese Belastungen sorgen im verformten Zustand für einen hohen Anteil an plastischer Durchbiegung. Auch eine Querstrebe im unteren Bereich der Struktur wirkt kontraintuitiv. Dabei begünstigt diese Querstreben generelle globale Strukturstabilität. Die globale Struktursteifigkeit ist für dieses Beispiel relevant, da keine Sperrungen von Freiheitsgraden als Lagerung definiert sind. Das Deformationsbild zeigt außerdem, dass ein überwiegender Teil der Strukturstreben im Deformationsprozess beteiligt ist. In Abbildung 9.12 sind Verhalten bezüglich Verschiebung, Beschleunigung und Geschwindigkeit des starren Pfahls gezeigt. Die Plotdaten zeigen eine kontinuierliche Reduktion der Geschwindigkeit. Außerdem wird der Pfahl vor den geforderten $150 mm$ gestoppt.

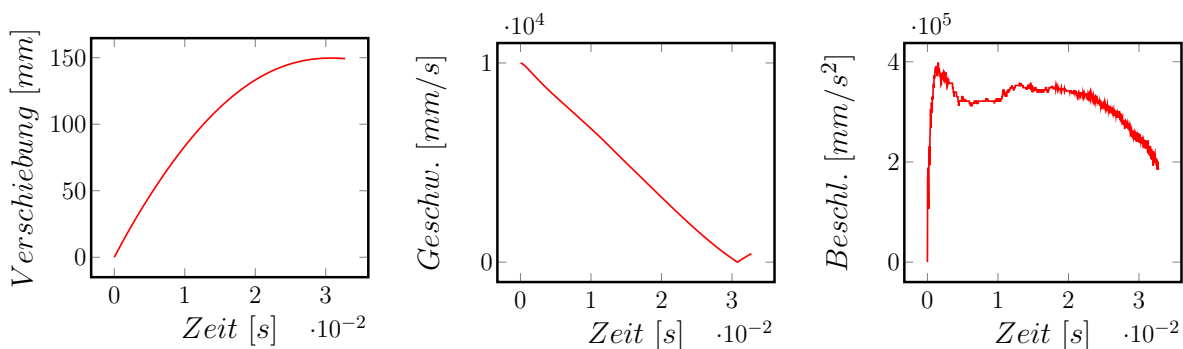


Abbildung 9.12: Zeigt die Verschiebung, die Geschwindigkeit und die Verzögerung (resultierend) über die Zeit – Starrer Pfahl bei $100 kg$

9.2.2 Variation Masse Pfahl – Minimiere die Kontaktkraft

Das zuvor verwendete Beispiel wird im Folgenden erneut verwendet, jedoch wird die Masse des Impaktors variiert. Die Variationen von Parametern kann Unregelmäßigkeiten des heuristischen Prozesses aufzeigen. Außerdem kann damit die Leistungsfähigkeit des Verfahrens demonstriert werden. Die Masse des Pfahls wird in gleichen Abständen von $100 kg$ um je $10 kg$ bis auf $60 kg$ reduziert und jeweils der Prozess neu gestartet. Des Weiteren werden alle Randbedingungen und Optimierungseinstellungen beibehalten. Abbildung 9.13 zeigt eine Auswahl von Ergebnissen aus insgesamt 5 Programmstarts zur Optimierung der Strukturen für die Kontaktkraftminimierung verschiedener Impaktormassen. Die Strukturen ähneln sich und unterscheiden sich in wenigen quer zur Lastrichtung liegenden Streben. Tendenziell stellen sich leichtere Strukturen bei weniger Masse des Impaktors ein. Durch die diskrete Wandstärkenabstastung treten Übereinstimmungen der Wandstärke bei einer Pfahlmasse

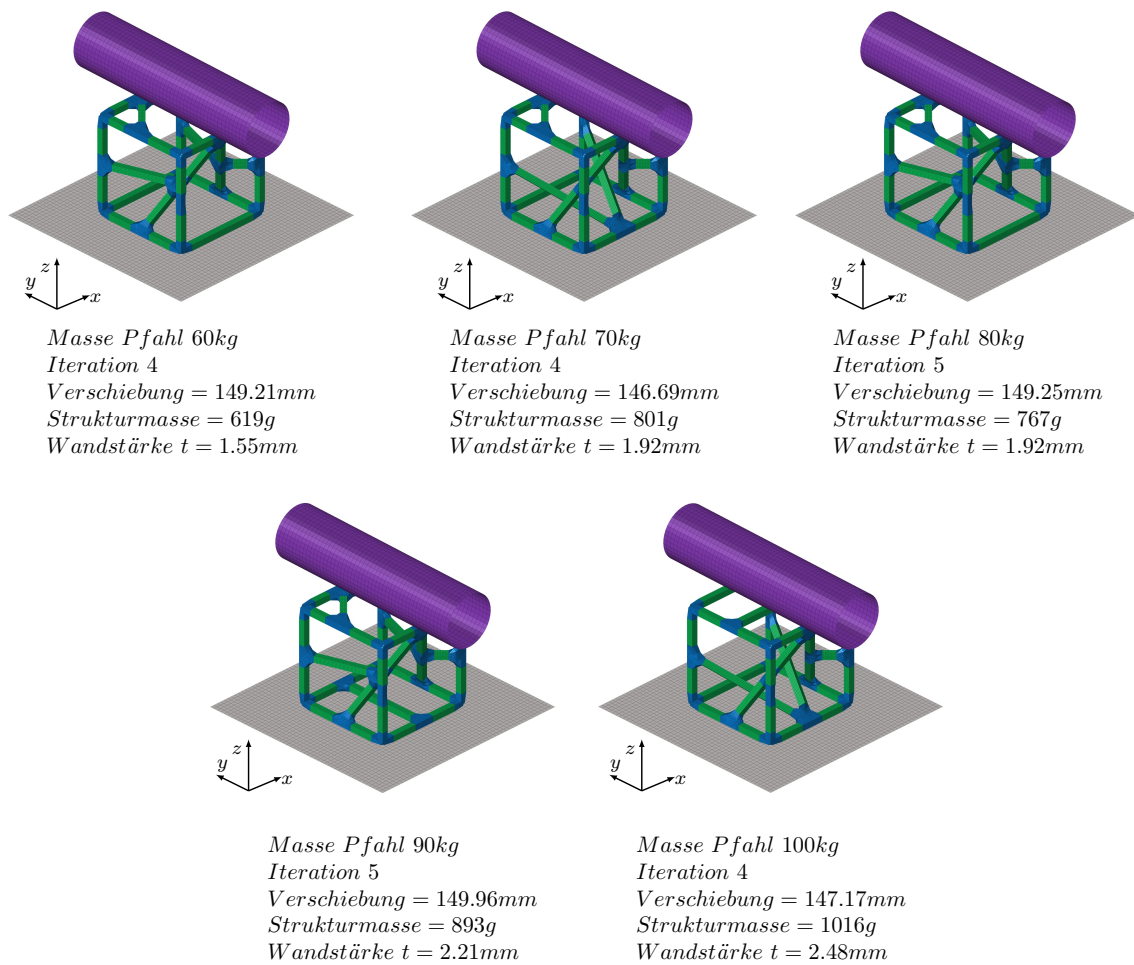


Abbildung 9.13: Auswahl von Entwürfen bei Variation der Masse des Pfahls: 60 kg, 70 kg, 80 kg, 90 kg, 100 kg – Minimiere die Kontaktkraft

von 70 kg und 60 kg auf. Die anders ausfallende Strukturmasse ist durch eine andere Anordnung von querverlaufenden Streben zu begründen. Darüber hinaus erzeugt das Verfahren für diese einfache Fragestellung mehrere Entwürfe mit ähnlichem Verhalten je Masseklasse und je Iteration. Die erzeugten Strukturen zeigen deutlich, dass die Kombination aus heuristischen Vorschlägen und Wandstärkenabstimmung auch bei geänderten Parameter Lösungen für dreidimensionale Rahmenstrukturen erzeugt werden können. Ein Ausschnitt aus den Deformationsbildern ist in Anhang Abbildung A.3 dargestellt. In Abbildung 9.14 sind die dazugehörigen Kraft-Weg-Verläufe abgebildet. Hier zeigen sich die abgestuften Kraftniveaustufen je Masseklasse des Pfahls. Dabei ist ersichtlich, dass sich für jede Lösung eine individuelle nah an einem rechteckigen Verlauf liegendes Energieabsorptionsverhalten eingestellt hat. Eine Übersicht über die Ergebnisse der verschiedenen Optimierungsdurchläufe gibt die Tabelle 9.5. Die orange markierten Varianten sind parallele Ergebnisse mit sehr ähnlichem Kraftniveau bzw. -verläufen je Iteration. Die Abstimmung von Masse des Pfahls, Masse des Rahmens und der Bauraumdimension müssen zu Beginn abschätzungsweise erfolgen. Das Ausbalancieren der Dimensionen des Lastfalls zur Dimensionierung der Rahmenstruktur hängt vom gesamten Szenario ab. Dazu zählt die Art des Lastfalls und ob die Last eher

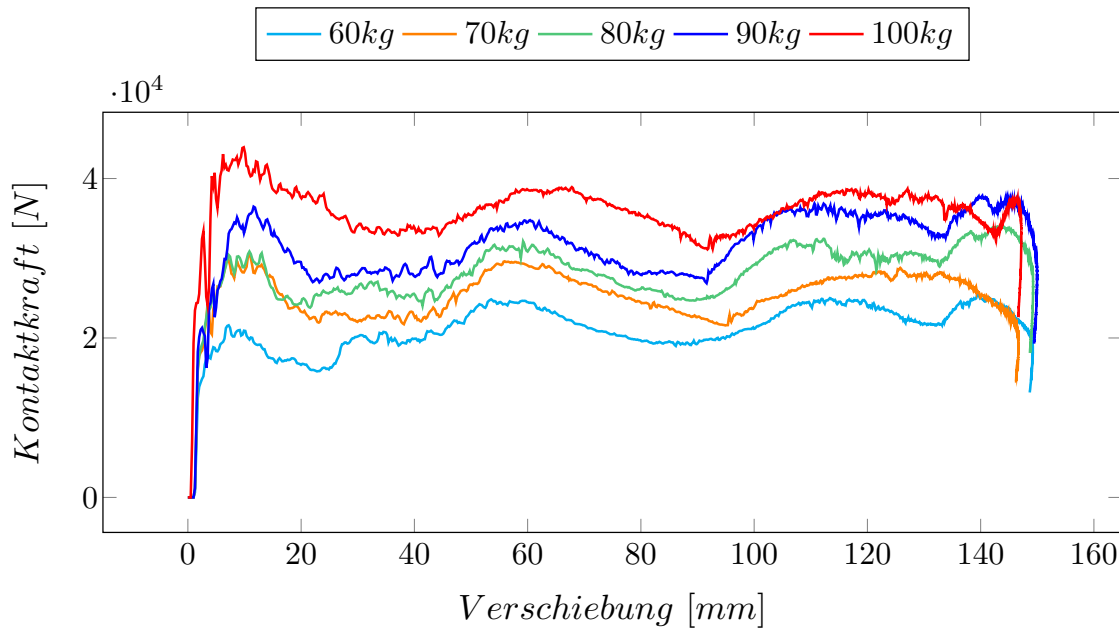


Abbildung 9.14: Kraft-Weg-Verläufe aus Parameterstudie Minimiere die Kontaktkraft bei Reduzierung der Impaktormasse um je 10 kg. Zeigt die einzelnen Kontaktkraftniveaustufen der Ergebnisse zu Abbildung 9.13

Tabelle 9.5: Starrer Pfahl trifft Rahmenstruktur mittig – Minimiere die Kontaktkraft; Masse des Pfahls: 100 kg, 90 kg, 80 kg, 70 kg, 60 kg. In Iteration 0 und Iteration 1 wird die Verschieberestriktion nicht eingehalten. Entwürfe innerhalb einer Pfahl-Masseklasse auf ähnlichem Kraftniveau farblich markiert (orange)

Iteration [-]	100 kg	90 kg	80 kg	70 kg	60 kg
0	-----	-----	Aufgeschlagen	-----	-----
1	-----	-----	Aufgeschlagen	-----	-----
2	43825 N	40559 N	35663 N	32121 N	27729 N
3	41860 N	38722 N	36091 N	31822 N	26536 N
4	42693 N	39907 N	33954 N	29555 N	25297 N
5	42149 N	37685 N	33491 N	29952 N	25662 N
6	43624 N	38950 N	34130 N	29746 N	25893 N
7	41302 N	40109 N	33498 N	30863 N	27043 N
8	46577 N	44884 N	37969 N	30765 N	28635 N

punktuell oder flächig eingeleitet wird. Auch der Einsatz von Versagensmodellen als Teil der Materialmodelle haben einen Einfluss auf die initiale Auslegung der Rahmenmodelle. Leicht eintretendes Versagen führt zu erheblicher Schwächung und ist Materialabhängig. Durch die Graphen-Syntax und dem flexiblen Aufbau, können ebenfalls höhere Massen des Pfahls verwendet werden. Eine erste Maßnahme wäre die initiale Vergrößerung des Querschnitts der Profile. Ist die Vergrößerung dieser Dimension aus voluminösen Einschränkungen nicht mehr möglich, muss der globale Rahmen vergrößert werden.

9.2.3 Minimiere die Strukturmasse

Bei der Reduzierung der Kontaktkraft in den Beispielen zuvor werden die Entwürfe bewertet, bei denen das Deformationsverhalten eine übergeordnete Rolle spielt. Durch die Sortierung nach der Kontaktkraft, setzen sich eher Strukturen durch, bei denen eine gleichmäßigere Verzögerung erfolgen soll. Im Kontrast dazu werden Entwürfe bei Zielen, wie der Massenminimierung, eher Strukturen generiert, die die gestellten Anforderungen ohne Berücksichtigung zur Art oder Höhe der Entschleunigung berücksichtigen. Die Sortierung nach Strukturen mit geringer Masse führt somit zu Entwürfen, bei denen die Verzögerungswerte hohe *Peaks* aufweisen können. Dennoch ist die Schwierigkeit gegeben, dass die Entwürfe längere Deformationswege ermöglichen sollen. Die folgende Reihe zeigt die Variation der Masse des Impaktors bei festgelegtem Ziel zur Minimierung der Masse der Rahmenstruktur. Tabelle 9.6 zeigt, die Übersicht über Ziel und Restriktionen.

Tabelle 9.6: Ziel und Restriktionen – Massenminimierung: Pohl trifft Rahmen mittig

Ziel	Restriktionen
Minimiere die Masse (ermittelt an triangulierter Struktur des Rahmens)	Verschiebung $\leq 150\text{ mm}$ Verbindungswinkel $\geq 15^\circ$ Symmetrie $YZ - Ebene$ Minimale Wandstärke 0.8 mm Maximale Wandstärke 3 mm

In Abbildung 9.15 ist eine Auswahl aus den Ergebnissen gezeigt. Dabei ist ersichtlich, dass die Ergebnisse eher Streben mit senkrechter und waagerechter Anordnung beinhaltet, als im Vergleich zu den Ergebnissen zur Kontaktkraftminimierung. Die Streben verlaufen dabei ausschließlich senkrecht zur Lastrichtung und teilweise, je nach zur Verfügung stehender Masse, quer zur Lastrichtung, um die Verschieberestriktion einzuhalten. Die alternativen Varianten schlagen auch hier ähnliche Lösungspfade für die verschiedenen Impaktormassen ein.

Im Beispiel zuvor konnte ein ideales Kraftniveau als Ziel aus der aufgenommenen Energie bei der Kontaktkraftminimierung ermittelt werden und als Vergleichswert dienen. Die Frage nach der theoretisch „besten“ Strukturmasse kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden. Die Ergebnisse erscheinen für diesen Lastfall und das geforderte Ziel als plausibel. Dabei handelt es sich um kurze struktursteife Ergänzungen, die eine geringe Masse begünstigen. Die Entwürfe mit überwiegend Strukturen und Streben in Lastpfadrichtung suggerieren eine gewisse Massen-Einsatzeffizienz. Im Bereich 60 kg und 70 kg wird die Impaktormasse zu leicht für das Szenario und besteht keine Möglichkeit mehr eine Verbesserung zu erzielen. Die Modelle verlaufen nah an der unteren Wandstärkengrenze und somit steigt die Masse in nachfolgenden Iterationen wieder an. Die Wandstärke im Bereich um 0.8 mm reicht nicht mehr aus, um die Verschieberestriktion einzuhalten und die vorgegebene Wandstärke von

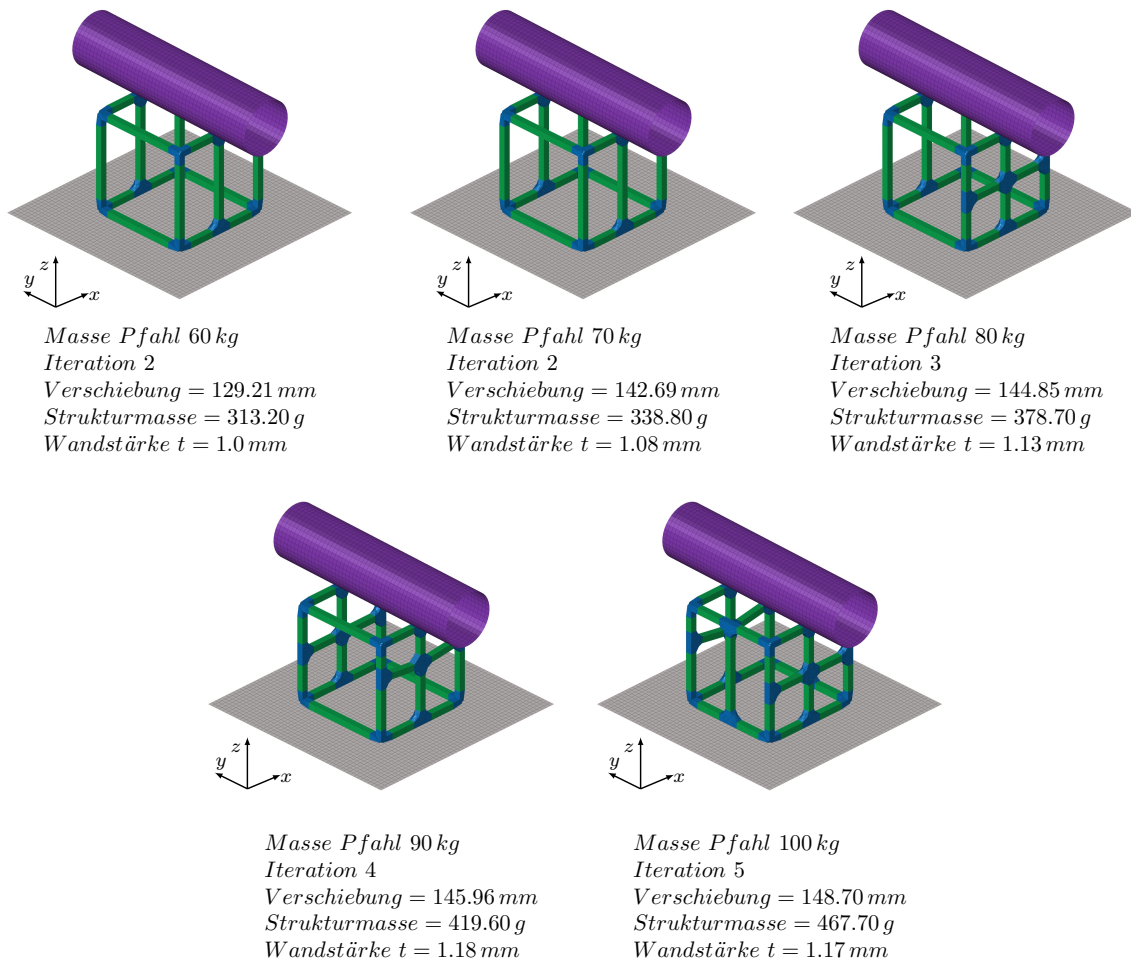


Abbildung 9.15: Auswahl von Entwürfen bei Variation der Masse des Pfahls: 60 kg, 70 kg, 80 kg, 90 kg, 100 kg – Minimiere die Masse der Struktur

1 mm ist zu hoch, um eine Intrusion nah an die Restriktionsgrenze zu führen. Das Verfahren ist mit der diskreten Wandstärkenevaluation nicht in der Lage den vollen möglichen Deformationsweg zu nutzen. Dadurch, dass die Wandstärke nicht weiter reduziert werden kann, entstehen zulässige Modelle, die aber nicht nah der Verschiebungsrestriktion von 150 mm liegen. Grundsätzlich ist der Entwurf zwar in einem zulässigen Bereich, doch idealerweise liegen Lösungen für diese Fragestellung an den vorgegebenen Restriktionsgrenzen. Die Nutzung des gesamten Deformationswegs zeugt von einer effizienteren Nutzung des Materials. Als Alternative könnten die Wandstärken genauer untersucht werden oder die Bauraumdimension reduziert werden.

Insgesamt sind die Ergebnisse plausibel. Das Verfahren erzeugt mit limitierten Möglichkeiten Entwürfe mit reduzierteren Massen als im Vergleich zu den Strukturen mit dem Ziel der Kontaktkraftminimierung. In den Deformationsbildern (siehe Anhang, Abbildung A.4) fällt auf, dass der überwiegende Teil der kinetischen Energie von lokal deformiert und die Energie abrupt aufgenommen wird. In Abbildung 9.16 sind die Kraft-Weg-Verläufe der Massenminimierung dargestellt. Die Verläufe sind im Vergleich zu den Varianten mit der Kontaktkraftminimierung weniger gleichmäßig ausgebildet. Die Vorgehensweise eröffnet an dieser Stelle

auch die Diskussion mit Fragestellung zur Gestaltung eines initialen Designs. Andernfalls fehlt dann vielleicht genügend Strukturstabilität. In Tabelle 9.7 ist eine Übersicht über die Massen aus den Entwürfen bis zum finalen Entwurf aufgelistet.

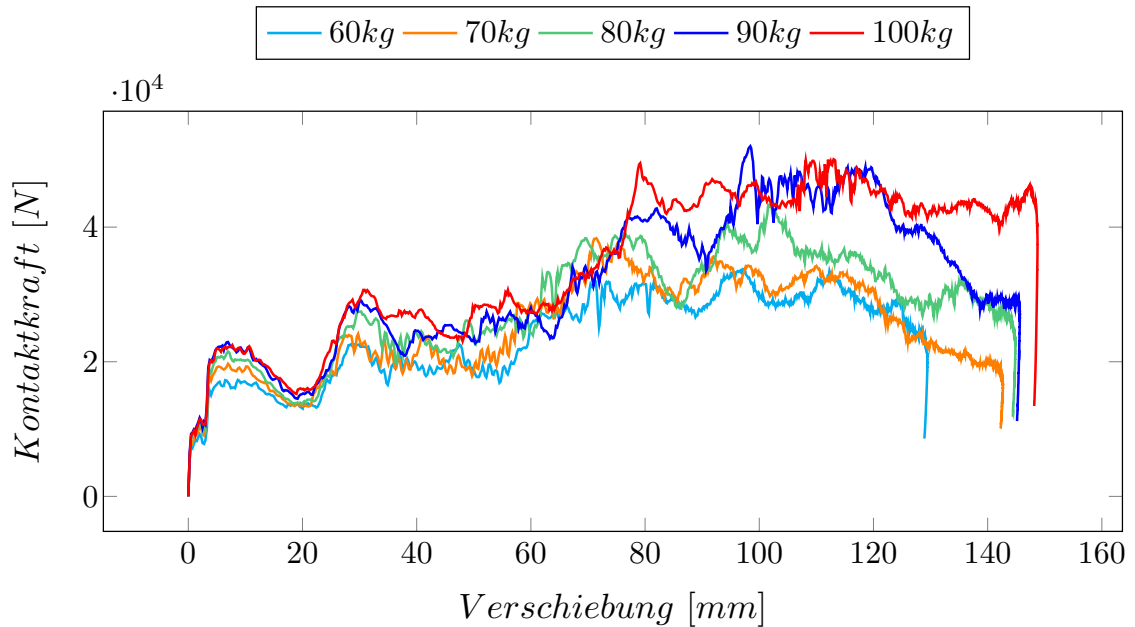


Abbildung 9.16: Kraft-Weg-Verlauf bei Variation der Masse (siehe Abbildung 9.15) des Pfahls: 60 kg, 70 kg, 80 kg, 90 kg, 100 kg – Minimiere die Masse der Struktur

Tabelle 9.7: Starrer Pfahl trifft Rahmenstruktur mittig – Minimiere die Masse der Struktur. In Iteration 0 und Iteration 1 wird die Verschieberestriktion nicht eingehalten. Finale Entwürfe innerhalb einer Masseklasse des Pfahls: 100 kg, 90 kg, 80 kg, 70 kg, 60 kg farblich markiert (orange)

Iteration [-]	100 kg	90 kg	80 kg	70 kg	60 kg
0	----	----	Aufgeschlagen	----	----
1	----	----	Aufgeschlagen	----	----
2	566 g	578 g	533 g	338 g	313 g
3	545 g	465 g	378 g	354 g	326 g
4	525 g	419 g	401 g	376 g	345 g
5	467 g	444 g	401 g	401 g	367 g
6	490 g	450 g	422 g	381 g	375 g
7	503 g	460 g	405 g	408 g	389 g
8	483 g	476 g	436 g	425 g	397 g

9.2.4 Prozessunsicherheit des Zielfunktionswerts

Auch bei der Kontaktkraftminimierung treten Prozessunsicherheiten auf, die einen Einfluss auf die Ergebnisfindung haben können. Die Prozessstarts wurden mit dem Ergebnis aus Iteration 4 ausgeführt, bei dem die würfelartige Struktur durch den Pfahl mit einer Masse von 100 kg belastet wird (siehe Abb. 9.13). Die Unterschiede im Bereich der restringierten Verschiebung werden eher als moderat eingestuft. In diesem Beispiel ist mit einem Wert von 147.16 mm von 150 mm zur Restriktionsgrenze noch genügend Abstand entstanden, sodass innerhalb von 50 Prozessstarts keine Restriktionsverletzung eintrat. Dennoch kann mit einer Differenz von 1.63 mm (Abb. 9.17) zwischen minimal und maximaler Strukturantwort Entwürfe entstehen, die bei Prozessneustart außerhalb des zulässigen Bereichs verlaufen können. Gleiches gilt für die Kontaktkraft selbst, siehe Abbildung 9.18.

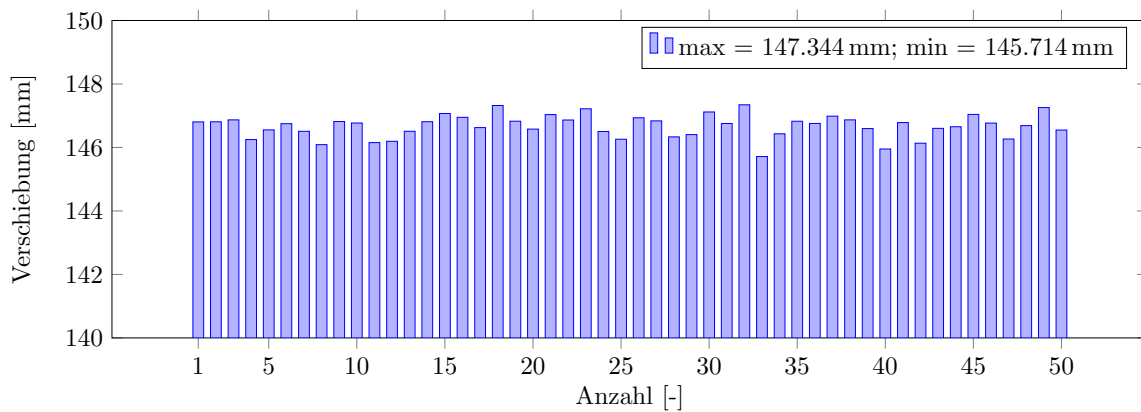


Abbildung 9.17: Nominale Unsicherheit der restringierten Verschiebung des Pfahls bei wenigen 50 Programmstarts – Die Prozessunsicherheit liegt im Bereich von 1.63 mm

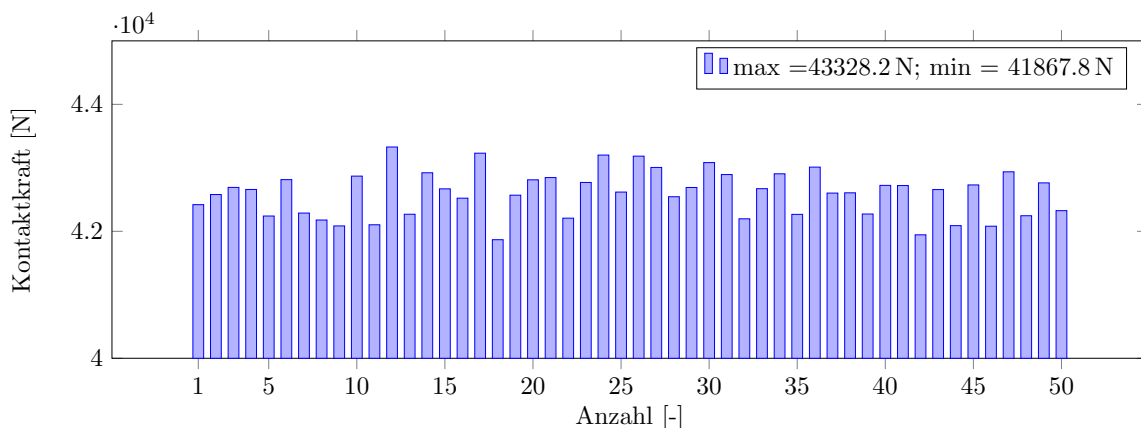


Abbildung 9.18: Nominale Variation der maximalen Kontaktkraft des Pfahls bei wenigen 50 Programmstarts – Die Prozessunsicherheit liegt im Bereich von 1461 mm

Hier beträgt der Unterschied 1460.4 N . In diesem Beispiel liegen die Verbindungsknoten zwar auch im Bereich der Lasteinleitung, doch die Berührungsflächen sind flach und eben

entsprechend dem Profilverlauf. Dennoch tritt eine Unsicherheit für die Optimierung und im Prozess auf. Für den Umgang kann die Restriktionsgrenze weicher formuliert werden, indem ein Korridor als zulässiger Bereich um die Grenze gebildet werden könnte. Weiterhin wäre die Definition eines Sicherheitsfaktors möglich.

9.3 Minimiere die Kontaktkraft bei einer Inlay-Struktur

Das nachfolgende Beispiel stellt ein Crash-Element aus dem vorderen Bereich eines Kraftfahrzeugs unter vereinfachten Bedingungen dar. Das Crash-Element oder auch Crashdose genannt befindet sich hinter dem Stoßfänger und sitzt vor den Längsträgern. Grundlegend soll die graphenbasierte Struktur als Inlay-Struktur eine Deformationszone füllen und den Deformationsprozess unterstützen. Die Elemente werden für den *Low Speed Crash* Versicherungslastfall ausgelegt (erwähnt in Kapitel 2.3). Der Aufbau des Modells (siehe Abb. 9.19) wird mit zwei Komponenten ausgeführt. Die Energieabsorption soll durch eine Kombination

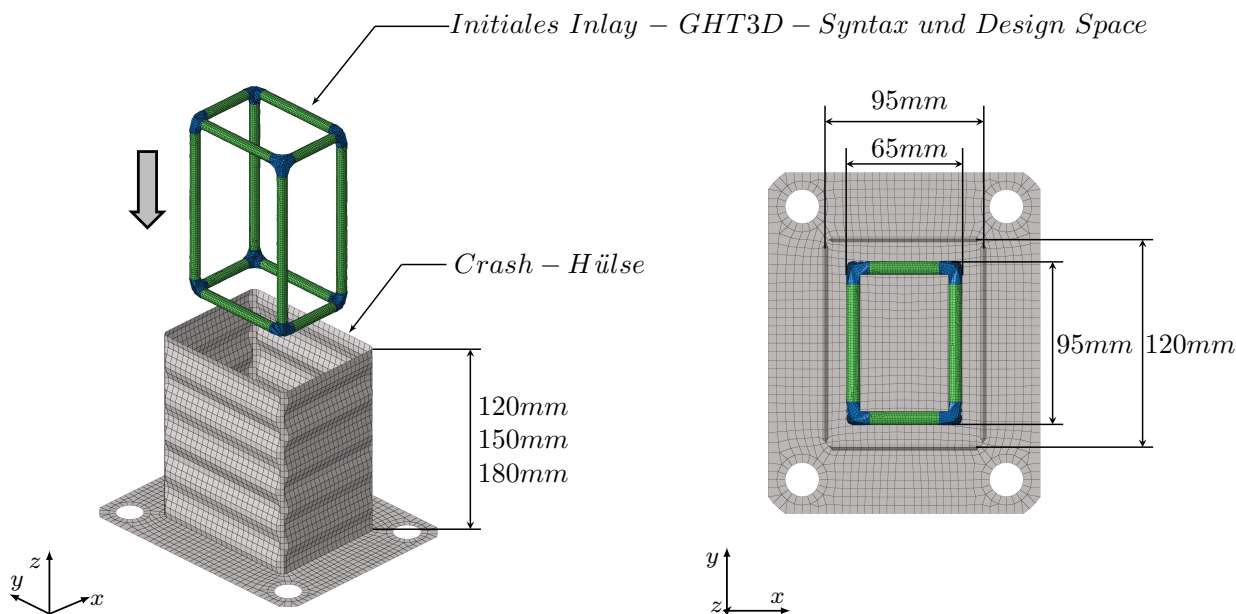


Abbildung 9.19: Geometrieaufbau – Inlayoptimierung für ein Crash-Element

aus Falten und Beulen der äußeren Hülse und plastischer Durchbiegungen infolge von anteiligen Querkräften der Inlay-Struktur erfolgen. Falten und Beulen erzeugt ein hohes Maß an Energieabsorption bezogen auf die Masse. Die Biegeanteile der inneren Struktur sollen diesen Deformationsprozess unterstützen und für glattere Kraft-Weg-Verläufe sorgen.

Den Streben der Struktur werden runde und hohle Querschnitte zugeordnet. Die Verbindungsknoten sind direkt mit den runden Streben fest verbunden. In Abbildung 9.20 ist das Deformationsverhalten der Ausgangsstruktur dargestellt. Die äußere Hülse stellt ein Strangpressprofil dar und ist auf einer Adapterplatte befestigt. Bei dem Strangpressprofil ist in einem zweiten Schritt ein Verprägungsbild aufgebracht und dient als Falthilfe. Die Hülse ist mit Schalen-Elementen und einer Elementkantenlänge von 5 mm vernetzt und besitzt eine

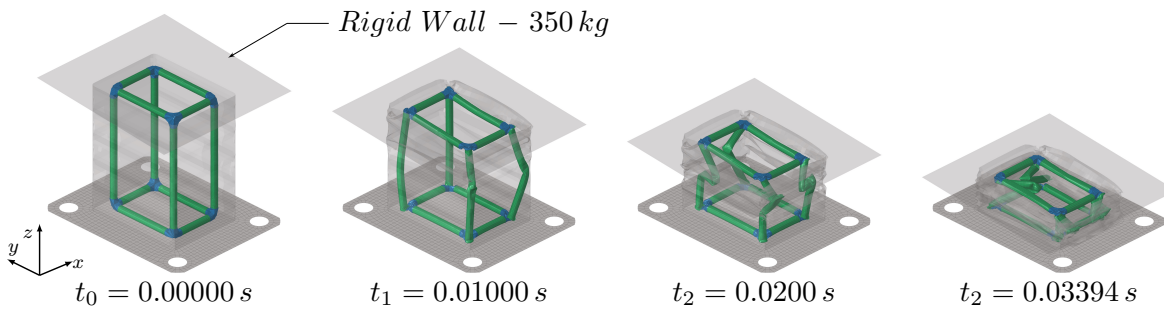


Abbildung 9.20: Zeigt das Deformationsverhalten des initialen Modells ausschnittsweise

Wandstärke von 1 mm . Der Lastfall für dieses abstrahierte Modell wird mit einer starren Wand realisiert, indem diese mit einer gegebenen Anfangsgeschwindigkeit und festgelegter Masse auf das Crash-Element trifft und für die Deformation sorgt. Die Anfangsgeschwindigkeit beträgt 15 km/h bei einer Masse von 350 kg , die über die Komponenteneigenschaft in LS-DYNA fest gelegt ist. Die starre Wand besitzt eine Neigung von 10° um die x -Achse. Jede

Tabelle 9.8: Ziel und Restriktionen – Kontaktkraftminimierung Crash-Element mit Inlay-Struktur

Ziel	Restriktionen
Minimiere die max. Kontaktkraft (gemessen durch Kontaktinterface)	Verschiebung $\leq 110\text{ mm}$ Verbindungswinkel $\geq 15^\circ$ Symmetrie $XZ - Ebene$ Maximaler Durchmesser 12 mm Minimaler Durchmesser 4 mm

Strukturkomponente für sich kann die kinetische Energie nicht alleine absorbieren. Die Simulation wird bei einer Verschiebung der starren Wand von 120 mm beendet. In der inneren Optimierungsschleife wird die Querschnittsgröße der Profile eindimensional evaluiert, denn Wandstärkenänderungen haben auf Meso-Level zu geringen Einfluss auf das Strukturverhalten. Die Elementgröße wird mit kleinerem Querschnitt automatisch verkleinert, sodass sich innerhalb jedes NURBS-Bogens mindestens 4 Finite-Schalen-Elemente befinden. Der runde Querschnitt besteht aus 4 NURBS-Kurven. Das führt zu einer Einsparung an Rechenzeit bei größeren Durchmessern, im Vergleich zu kleineren Durchmessern. Das initiale Modell ist nicht in der Lage, die gesamte kinetische Energie im System aufzunehmen. Die Energieabsorption zwischen Hülse und Inlay-Struktur wird mit ca. $50 : 50$ aufgeteilt und insgesamt werden initial ca. 40% der gesamt geforderten Energie aufgenommen. Einer der Annahmen für dieses Modell besteht darin, dass die Inlay-Struktur mindestens 50% der kinetischen Energie aufnehmen sollte, um genügend Einfluss auf den Zielfunktionswert zu besitzen. Die äußere Hülse wird nicht manipuliert, die Heuristiken und die innere Optimierungsschleife besitzen keinen Einfluss auf diese Komponente. Die Hülse ist bereits zu Beginn besonders

nachgiebig ausgeführt.

Als Ziel wird die Minimierung der maximalen Kontaktkraft definiert. Die Restriktionsgrenze der Verschiebung wird mit 110 mm festgelegt. Die Nutzung der vollen Länge ist nicht möglich, da ein Freiraum für das deformierte Material benötigt wird und das Crash-Element sonst im untersten Bereich auf einen Blockzustand wechseln kann. Zunächst wird die Optimierung mit einer Hüslenlänge von 150 mm durchgeführt. Zusätzlich sind Randbedingungen für das obere und untere Querschnittsmaß festgelegt. Die Ziele und Randbedingungen sind in Tabelle 9.8 übersichtlich dargestellt. In der inneren Optimierungsschleife werden 10 Funktionsaufrufe in Iteration 1 und ein weiterer Funktionsaufruf mit metamodellbasierten Parametern in Iteration 2 zugelassen. Bei einem Durchmesser von $< 4\text{ mm}$ sinkt der Einfluss der Inlaystruktur auf das gesamte Strukturverhalten stark. Der Abstand zwischen der Hülse und der Inlaystruktur wurde frei gelassen, damit sich die Hülse frei zusammenfallen kann und nicht in der Energieaufnahme eingeschränkt wird. Zusätzlich zu dem Lastfall wirkt noch eine Gravitationslast mit $9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Das Materialmodell besitzt simuliertes Versagen durch Elementlöschung durch ein Versagenskriterium und zwischen den Kontaktformulierungen wird Reibung von 0.15 berücksichtigt.

Eine Übersicht über die einzelnen Schritte vom initialen Entwurf bis zum finalen Entwurf ist in Abbildung 9.21 dargestellt. Die gezeigten Entwürfe weisen weiterhin eine recht gleichmäßig geteilte Energieaufnahme auf. Der Kraft-Weg-Verlauf des initialen Entwurfs und des finalen Entwurfs ist in Abbildung 9.23 gezeigt. Dabei ist ersichtlich, dass das initiale Design nicht in der Lage ist, die gesamte Energie, die in das System eingebracht wird aufzunehmen und geht gegen Ende der Simulation auf einen Blockzustand und die benötigte Kraft steigt an. Der finale Entwurf verläuft sehr nah am theoretischen Optimum. Das theoretische Opti-

Tabelle 9.9: Übersicht über den Optimierungsverlauf der Inlaystruktur für eine Hüslenlänge von 150 mm

	Verschiebung	Kraft	n Entwürfe	Funktionsaufrufe
initialer Entwurf	120.01 mm	41666.92 N	1	1
Iteration 1 heurist. Manip.	120.01 mm	38083.10 N	6	6
Iteration 2 heurist. Manip.	105.19 mm	42194.37 N	23	253
Iteration 3 heurist. Manip.	107.79 mm	42175.51 N	24	264
Iteration 4 heurist. Manip.	107.85 mm	42389.78 N	23	253
Iteration 5 heurist. Manip.	109.54 mm	44607.12 N	24	264
Iteration 6 heurist. Manip.	108.73 mm	43108.56 N	23	253
Iteration 7 heurist. Manip.	109.77 mm	41175.77 N	21	231
Iteration 8 heurist. Manip.	106.49 mm	45464.76 N	19	209

mum bildet sich aus der gesamten Energie des Systems, die direkt aus dem Kraft-Weg-Plot ermittelt wird und wird anschließend mit der maximal zulässigen Verschiebung von 110 mm dividiert. Der so errechnete Wert beträgt 31693.80 N . Das Deformationsbild ist in Abbildung 9.22 gezeigt. Grundsätzlich sind geeignete Entwürfe im Bereich des Durchmessers von

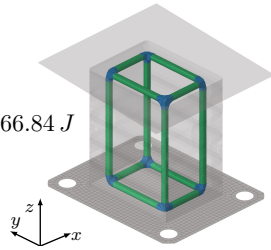
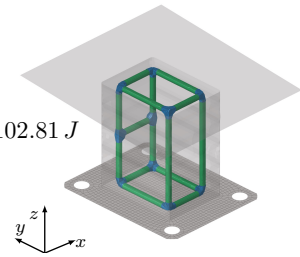
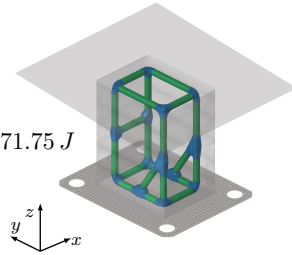
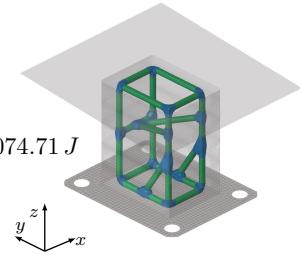
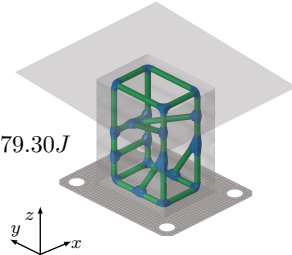
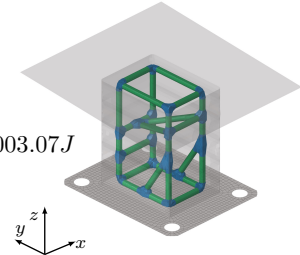
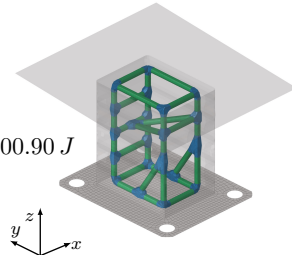
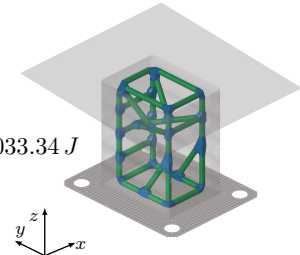
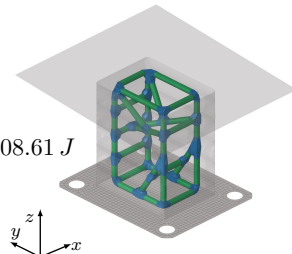
*Iteration 0**Verschiebung = 120.01 mm**Kontaktkraft = 41666.92 N**Energie aufgenommen = 2066.84 J**IE - Verhältnis = 33 : 77**Durchmesser = 8.00 mm**(Blockzustand)**Iteration 1**Verschiebung = 120.01 mm**Kontaktkraft = 38083.10 N**Energie aufgenommen = 2102.81 J**IE - Verhältnis = 33 : 77**Durchmesser = 8.00 mm**(Blockzustand)**Iteration 2**Verschiebung = 105.19 mm**Kontaktkraft = 42194.37 N**Energie aufgenommen = 3071.75 J**IE - Verhältnis = 51 : 49**Durchmesser = 8.90 mm**Iteration 3**Verschiebung = 107.79 mm**Kontaktkraft = 42175.51 N**Energie aufgenommen = 3074.71 J**IE - Verhältnis = 46 : 54**Durchmesser = 8.15 mm**Iteration 4**Verschiebung = 107.85 mm**Kontaktkraft = 42389.78 N**Energie aufgenommen = 2979.30 J**IE - Verhältnis = 47 : 53**Durchmesser = 7.79 mm**Iteration 5**Verschiebung = 109.54 mm**Kontaktkraft = 44607.12 N**Energie aufgenommen = 3003.07 J**IE - Verhältnis = 48 : 52**Durchmesser = 7.79 mm**Iteration 6**Verschiebung = 108.73 mm**Kontaktkraft = 43108.56 N**Energie aufgenommen = 3000.90 J**IE - Verhältnis = 48 : 52**Durchmesser = 7.72 mm**Iteration 7**Verschiebung = 109.77 mm**Kontaktkraft = 41175.77 N**Energie aufgenommen = 3033.34 J**IE - Verhältnis = 47 : 53**Durchmesser = 7.38 mm**Iteration 8**Verschiebung = 106.49 mm**Kontaktkraft = 45464.76 N**Energie aufgenommen = 3008.61 J**IE - Verhältnis = 45 : 55**Durchmesser = 7.75 mm*

Abbildung 9.21: Übersicht über die einzelnen Entwürfe vom initialen Design bis zum besten Entwurf in Iteration 7; IE stellt das Verhältnis der aufgenommenen inneren Energie zwischen [äußerer Hülse : Inlay-Struktur] dar

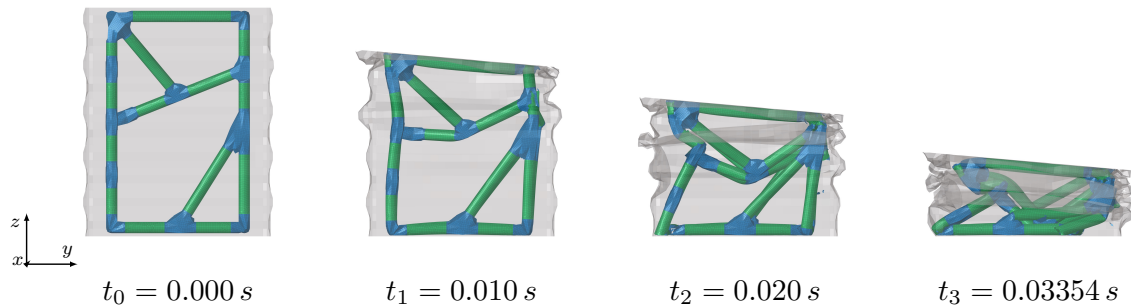


Abbildung 9.22: Deformationsbilder aus Simulation; finaler Entwurf aus Iteration 7 – Modelllänge 150 mm , Durchmesser 7.38 mm in der Seitenansicht

$< 4\text{ mm}$ nicht ausgeschlossen. Der Füllgrad von neuen *Edges* sollte dafür ggf. entsprechend hoch sein. Das derzeitige Verfahren erzeugt in jeder Iteration lediglich 1 – 2 neue *Edges*. Das Verfahren würde für deutlich filigranere Lösung eine sehr lange Laufzeit benötigen, in der lange keine zulässigen Lösungen generiert werden könnten. Dadurch fehlen Kriterien zur Bewertung für einen erfolgreichen selektiven Prozess. Dabei fällt auf, dass die äußere Hülse durch das gewählte Verprägungsbild mehrere falt- und beulstellen aufweist. Die Übersicht über den Optimierungsverlauf und der Anzahl an Rechnung pro Iteration befindet sich in Tabelle 9.9. Dabei ist ersichtlich, dass die Evaluation des Durchmessers ab Iteration 2 ein-dimensional erfolgt. In Iteration 1 kann eine geringere Kontaktkraft entstehen, da hier die Restriktionsgrenze noch nicht eingehalten wird.

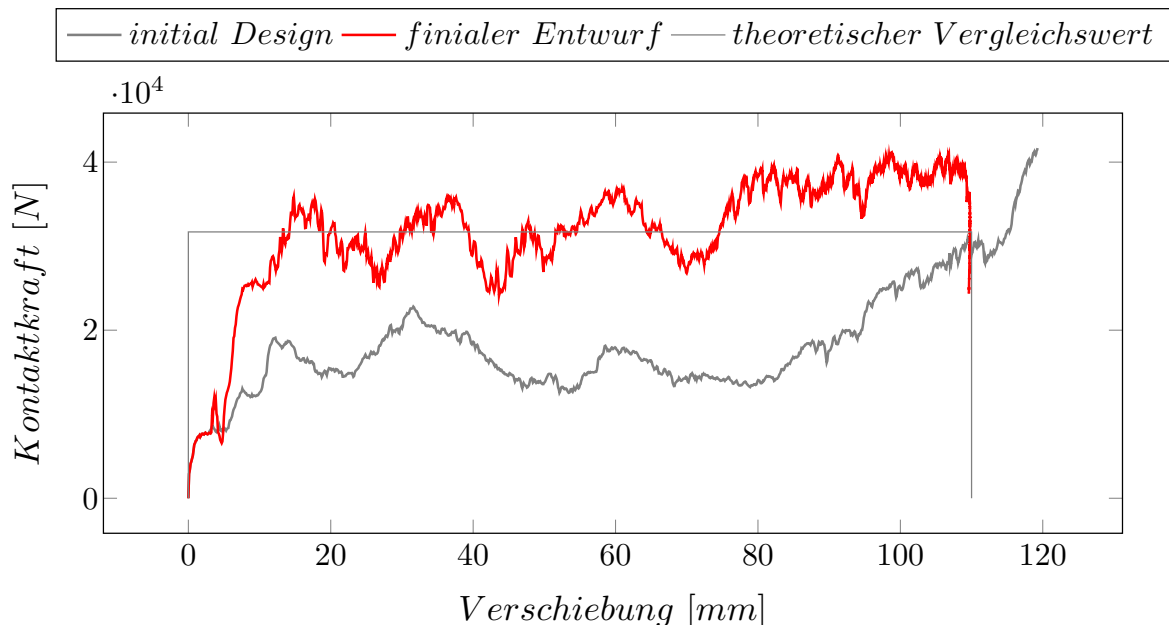


Abbildung 9.23: Kraft-Weg-Verlauf von initialem Modell aus Iteration 0 und finalem Entwurf aus Iteration 7; theoretisches Optimum aus aufgenommener Energie ermittelt über Trapezregel-Integration und liegt bei 31693.80 N

9.3.1 Änderung der Intrusionsrestriktion und Bauraumlänge

Eine mögliche Fragestellung zur Crash-Dose kann die Bestimmung des Bauraums sein. Einen besonderen Einfluss auf die Ergebnisse hat die Definition der Verschiebungsrestriktion und somit auch die Länge der Hülse. Die gegebene aufzunehmende Energie ist über das Fahrzeuggewicht und dessen Anfangsgeschwindigkeit definiert. Weiterhin sind Restriktionen von dahinterliegenden Komponenten vorgegeben, denn in den Längsträgern dürfen nur geringe bis keine plastischen Dehnungen nach vollendeter Deformation auftreten. Das Verfahren wird zusätzlich für eine Hülslenlänge von 180 mm und 120 mm ausgeführt. In Abbildung 9.24 ist das Ergebnis mit einer Modelllänge von 120 mm dargestellt. Das Ergebnis ähnelt dem Inlay mit einer Modelllänge von 150 mm .

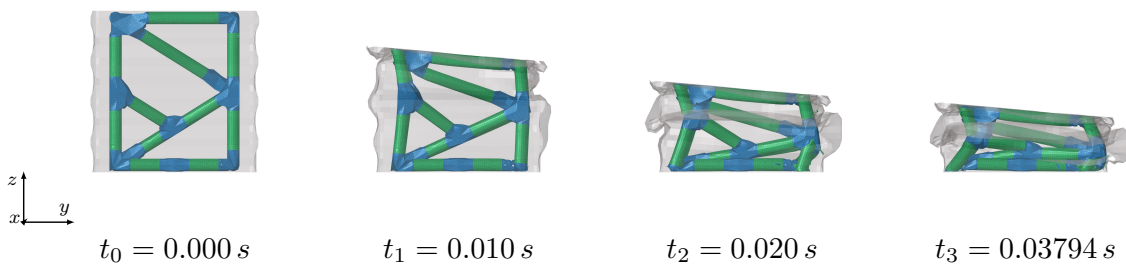


Abbildung 9.24: Deformationsbilder aus Simulation; finaler Entwurf aus Iteration 7 – Modelllänge 120 mm mit einem Durchmesser von 6.14 mm

In Abbildung 9.25 ist das Deformationsverhalten des finalen Entwurfs mit einer Modelllänge von 180 mm dargestellt. Im Vergleich fällt auf, dass der Durchmesser der Inlay-Struktur für die Modelllänge von 180 mm mit 6.14 mm geringer ausfällt als bei einer Modelllänge von 120 mm mit 9.19 mm .

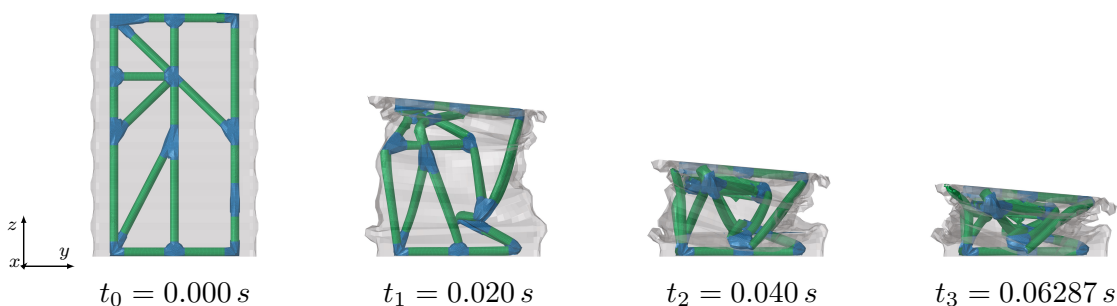


Abbildung 9.25: Deformationsbilder aus Simulation; finaler Entwurf aus Iteration 7 – Modelllänge 180 mm mit einem Durchmesser von 9.19 mm

Für verschiedene Bauraumlängen entstehen bei gleichem systemischen Energieniveau unterschiedliche Kraftniveaustufen. Abbildung 9.26 zeigt die Kraft-Weg-Verläufe im direkten

Vergleich zu den jeweiligen theoretisch optimalen Vergleichswerten. Insgesamt lassen sich aus den Kraft-Weg-Verläufen relativ gleichmäßige Verläufe ablesen. Sie stellen damit eine Trennung der Längenklassifizierung dar. Die einzelnen Kraft-Weg-Verläufe stellen im Ergebnis eine Überlagerung von zwei Deformationsverhalten dar. Die Energieaufnahme besteht aus gewichtseffizienterem Falten und Beulen der äußeren Hülse mit weniger glatten Verzögerungseinfluss und Deformationsanteilen der Rahmenstruktur mit glatterem Verzögerungseinfluss. Das Verfahren erzeugt für jede Längenklasse ein klar erkennbares nah an einem rechteckigen Verlauf liegendes Ergebnis. In Tabelle 9.10 sind einige Eigenschaften im Überblick gegenübergestellt. Zur zusätzlichen Erläuterung der einzelnen Werte sei an dieser Stelle auf Kapitel 2.3 verwiesen.

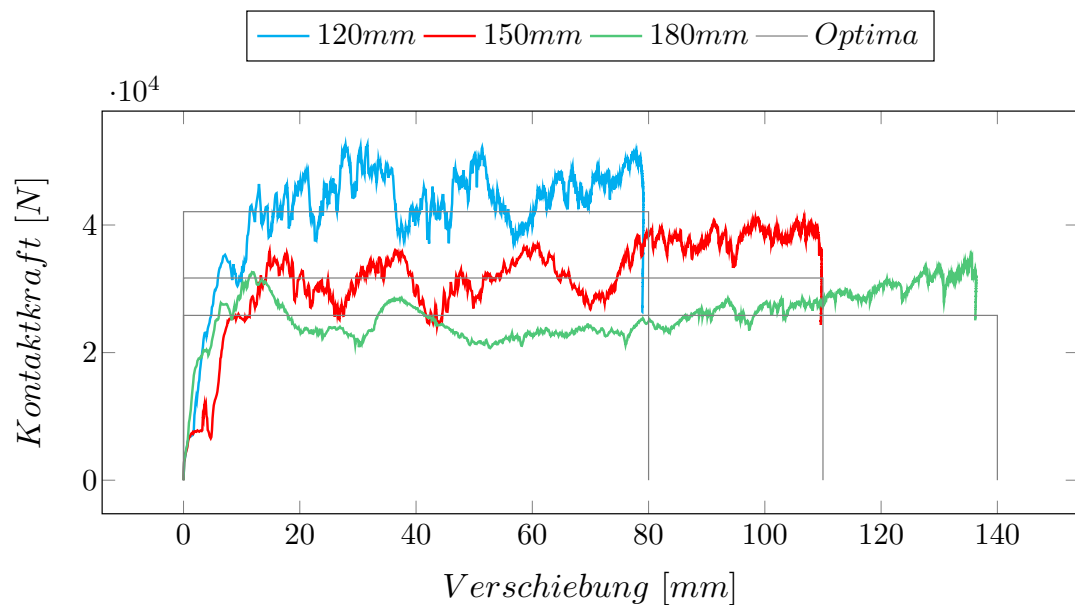


Abbildung 9.26: Kraft-Weg-Verlauf bei Variation der Bauraumlänge: 120 mm, 150 mm und 180 mm – Minimiere die maximale Kontaktkraft

Tabelle 9.10: Ziel und Restriktionen – Unter Biegung belasteter Rahmen 600 g, Übersicht über die Entwürfe zum finalen Design in Iteration 5; *IE* : *innere Energie*

Modelllänge	Masse Wand	Geschw. Wand	kin. Energie	Masse ges.	Masse Inlay
180 mm	350 kg	4,167 m/s	3038.68 J	383.80 g	173.50 g
150 mm	350 kg	4.167 m/s	3038.68 J	336.70 g	162.70 g
120 mm	350 kg	4.167 m/s	3038.68 J	358.40 g	217.70 g
	F_{peak}	E_a	F_m	SEA	CFE
180 mm	34878.60 N	3513.24 J	25832.65 N	9.15 J/g	0.74
150 mm	41175.78 N	3476.81 J	31693.80 N	10.33 J/g	0.77
120 mm	52594.76 N	3329.23 J	42088.87 N	9.29 J/g	0.80
	γ	IE	IE Inlay	IE Hülse	
180 mm	0.136 m	3179.66 J	1277.17 J	1902.49 J	
150 mm	0.110 m	3032.98 J	1594.84 J	1438.14 J	
120 mm	0.079 m	2949.91 J	2024.57 J	925.34 J	

9.3.2 Diskussion

Im Folgenden werden einige offene diskussionswürdige Punkte aus technischer und sinngebender Sicht genannt. Eine der wichtigsten Fragen dreht sich um die Fertigbarkeit von Lösungsvorschlägen, die aus automatisierten Optimierungsverfahren entstehen. Mit Selective Laser Melting (SLM) Verfahren können komplexe Strukturen aus Metall gedruckt werden. Metallurgisch gedrucktes Material kann Schwierigkeiten in der Prognosegüte in Simulationen bereiten. Das verschmolzene Pulver ist in der fertigen Struktur vermutlich nicht homogen verteilt bzw. weist ein ungleichmäßiges Deformationsverhalten auf. Zur Kompensation können anschließend ggf. Wärmebehandlungen für ein gleichmäßig verteiltes Materialverhalten sorgen. Bisher sind die Streben geometrisch im Querschnitt rund ausgeführt aber hohl. Für weitere Entwicklungsarbeiten sollten die Streben mit Material massiv ausgeführt sein. Das hat den Hintergrund, dass gegebenenfalls im Fertigungsprozess sonst Pulver im Inneren der Struktur verbleibt und nicht entfernt werden kann. Diese Geometrieänderung zieht eine Modellierungsänderung von Schalen-Elementen auf Volumen-Elementen nach sich. Dazu müssen neue Optimierungsdurchläufe gestartet werden, um das geänderte Strukturverhalten zu analysieren bzw. zu evaluieren. Zudem fehlt in diesem Modell eine Verbindungsmodellierung zwischen Inlay-Struktur und Adapterplatte, welche zum Teil zu *Sliding-Effekten* führt. Für weitere Untersuchungen müssen Verbindungsmodellierungen eingebracht werden. Das unkontrollierte Wegrutschen der Struktur am Boden beeinflusst die Strukturbildung und erfordert eine größere globale Struktursteifigkeit des Inlays. Weiterhin müssen SLM-Fertigungsrestriktion zur Berücksichtigung von Überhängen beim Drucken implementiert

werden. Die Umsetzung könnte graphenbasiert erfolgen, um ggf. Stützstrukturen zu vermeiden. Dazu zählt, dass Streben keinen Überhangwinkel von 45 Grad übersteigen. Eine erste Lösung wäre die Ermittlung von Winkeln zwischen einem senkrechtem Lot und freilaufenden Graphen-Elementen. Das führt vermutlich zu starken Einschränkungen in der Lösungsfindung und muss untersucht werden. Einer der Vorteile der Inlay-Struktur liegt in einer möglichen glatteren Verzögerung und sorgt in Kombination für gute Ergebnisse für verschiedene Längenausführungen. Grundsätzlich können Materialmodelle, Randbedingungen, Lastfälle und Aufbau des Simulationsmodells in Bezug auf die Größe der Baugruppen für Lastfälle mit höheren Massen geändert bzw. erweitert werden. Bei einer umfangreichen Erweiterung sind stark ansteigende Rechenzeiten zu erwarten, denn die Elementgröße für sehr dünne Streben ist entsprechend klein. Die derzeitig variierende Elementkantenlänge in Abhängigkeit der Querschnittsgröße ist für die Validität von Simulationsmodellen eher als kritisch zu betrachten. Fragestellungen zu dem Abstand zwischen Hülse und Inlay-Struktur sind für diesen Lastfall von Bedeutung. Alternativ kann die Inlay-Struktur auch den vollen möglichen Bauraum ausfüllen und dadurch direkt mit der äußeren Hülse in Wechselwirkung treten. Eine logische Konsequenz besteht ebenfalls darin, einen Einfluss auf die äußere Hülse durch Manipulation im Optimierungsprozess durch beispielsweise Heuristiken oder Parameteroptimierung für eine bessere Abstimmung zu ermöglichen. Zudem kann das Verprägungsmuster der Hülse für diesen Lastfall detaillierter ausgeführt werden und sollte ggf. auf die Inlay-Struktur abgestimmt sein. Eine äußere Hülse ist notwendig, denn es gibt noch weitere Anforderungen an die Komponente, wie beispielsweise Abschleppplastfälle. Inlaystrukturen zur Füllung von Deformationszonen sind auch in anderen Bereichen denkbar, wie beispielsweise Holme oder Schweller.

9.4 Layout Findung im Bereich eines Vorderwagens

In der folgenden Studie wird ein größeres Modell zur experimentellen Layout Findung im Bereich eines Vorderwagens erzeugt, siehe Abbildung 9.27. Die Struktur wird im folgenden ref. Modell genannt und soll mehrere statische und dynamische Lastfälle und für die verschiedenen Belastungsebenen relevante Komponenten berücksichtigen. Das Fahrzeugskelett wird mittels GHT3D-Syntax abgebildet. Das Fahrwerk bzw. die Reifen haben einen hohen Einfluss auf die Kinematik des Modells und werden in abstrahierter Form über Balken-Elemente angebunden und in die Simulation integriert. Die Verbindung der Balken-Elemente an den vorgegebenen Verbindungsknoten werden über RBEs (*Rigid Body Elemente*) realisiert. Außerdem werden zwei Stoßfänger für unterschiedliche Lastniveaustufen im vorderen und hinteren Bereich angebunden, die ebenfalls als Lasteinleitung verwendet werden können. Die Verbindungen werden über *Tied*-Kontaktformulierungen an den Blechen ausgeführt. Für das Skelett sind die Struktur- bzw. Lastpfade aus dem Finite-Elemente Modell des Honda Accord Modell von 2017¹ entnommen. Das daraus abgeleitete Drahtmodell ist mittels

¹Download: Honda Accord Modell, US-Behörde *National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)*

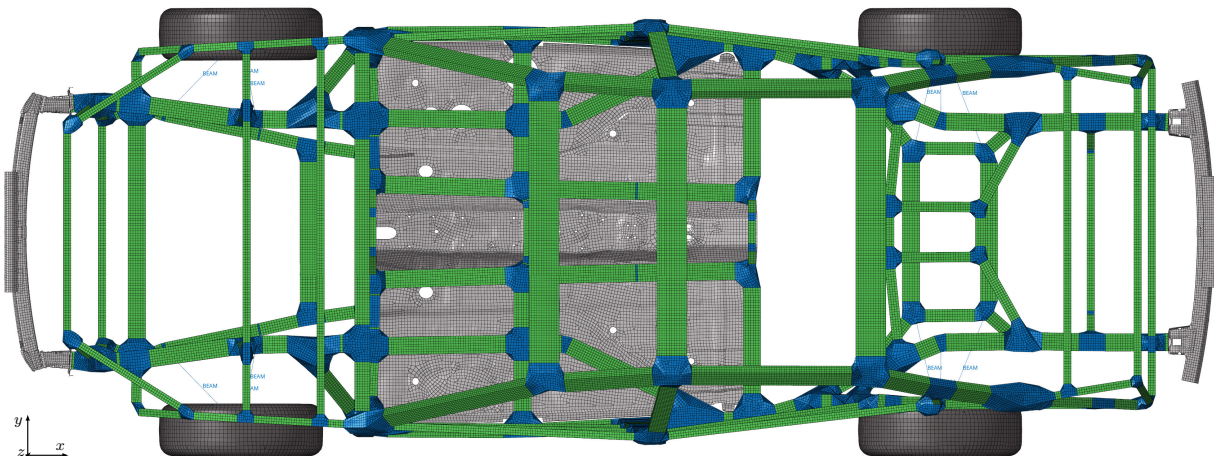


Abbildung 9.27: Draufsicht Simulationsmodell basierend auf den Strukturpfaden des Honda Accords, erzeugt mittels GHT3D-Syntax (grün, blau). Zusätzlich einflussreiche Komponenten für Lastfälle und Kinematik angehängt.

Skript in die Graphen-Syntax überführt wurden. Aus der Graphen-Syntax lässt sich mit den derzeit möglichen Funktionalitäten des GHT3D-Prozesses das Finite-Elemente-Modell automatisch erzeugen, siehe Abbildung 9.28. Zusätzlich sind für verschiedene Last- bzw. Trägerpfade unterschiedliche Querschnitte vergeben. Zur besseren Schubsteifigkeit wird ein Teil des Unterbodens als Schubfeld ergänzt. Das Unterbodenblech ist aus dem ursprünglichen Honda Accord Modell entnommen. Eines der Ziele in dieser Arbeit wird der Layout Findung von Teilstrukturen in Kraftfahrzeugen gewidmet. Für eine erste Umsetzung ist eine LS-DYNA Modell-Includestruktur aufgebaut, sodass der GHT3D-Prozess die graphenbasierte Struktur nach den heuristischen Regeln manipulieren kann und im Anschluss die Berechnungen mit den eingefügten Komponenten erfolgen können. Als Materialkarten werden die

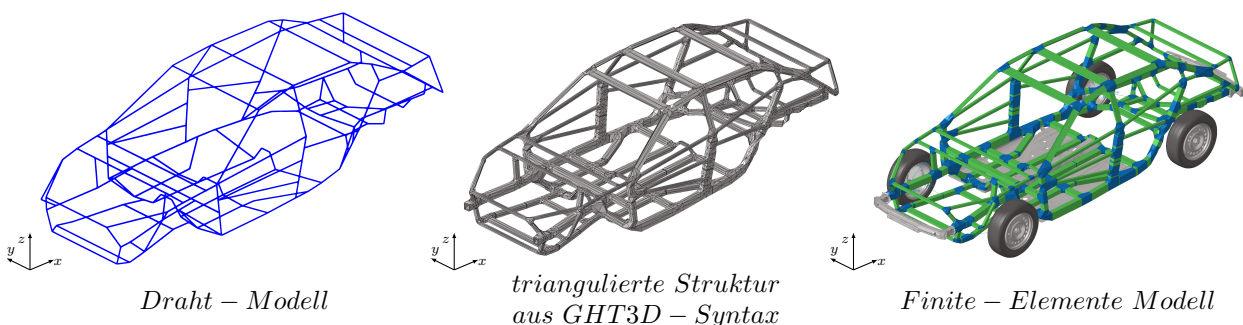


Abbildung 9.28: Draht-Modell, abgeleitet aus Honda Accord 2017 (links); triangulierte automatisch generierte Struktur aus GHT3D-Syntax (mitte); Finite-Elemente Modell mit crashrelevanten Komponenten (rechts)

für *Interstitial Free*, *Hochfester*- oder *Dualphasenstahl* (DP) aus dem Gesamtfahrzeug verwendet. Dem GHT3D-Rahmenmodell wird der DP-Stahl zugewiesen. Die Materialkurven sind in Abbildung 9.29 beispielhaft dargestellt. Die Kurven bilden das dehnratenabhängi-

ge (*Strain Rate* – *SR*) Materialverhalten ab. Grundsätzlich lassen sich für unterschiedliche *Edges* unterschiedliche Materialmodelle bzw. Materialkarten hinterlegen.

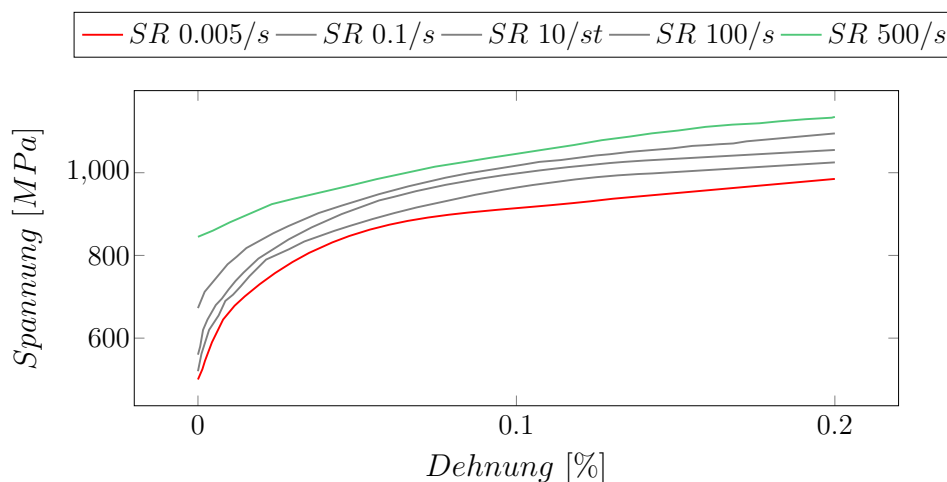
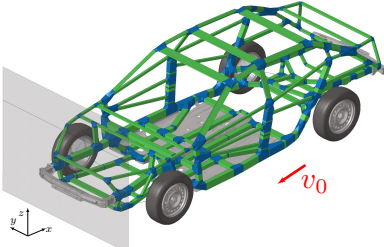
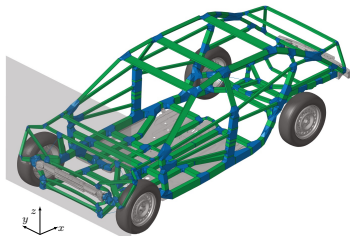
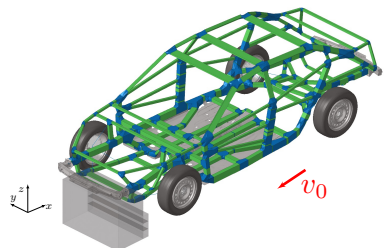
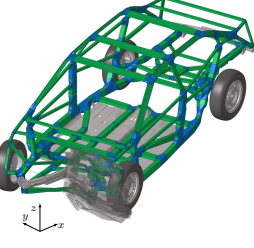
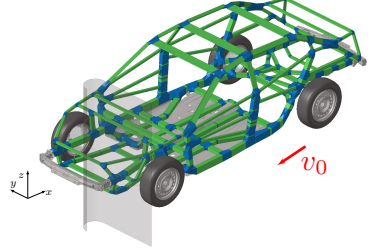
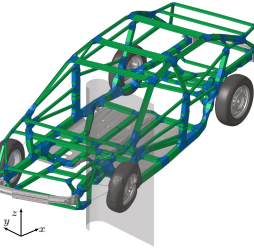
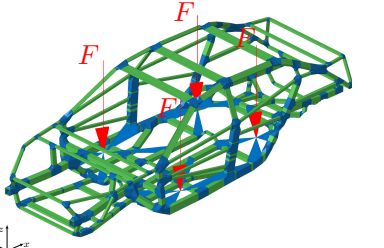
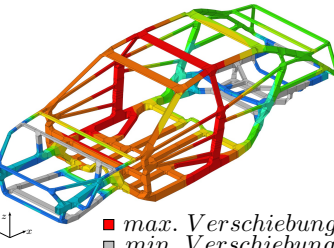
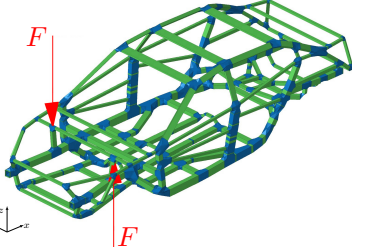
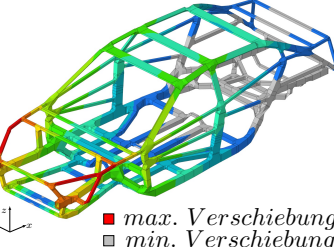


Abbildung 9.29: Dualphasen-Stahl – Hinterlegte dehnratenabhängige Materialkurven; *Strain Rate* (*SR*)

Die Position der angrenzenden Komponente und die dazugehörigen Materialkarten werden entsprechend dem Honda-Modell nach Vorgabe beibehalten. Das Gesamtfahrzeug besitzt eine Masse von 1680 kg , ermittelt am Finite-Elemente Netz und zusätzlichen Massenaufschlägen. Das abstrahierte graphenbasierte Modell wird mittels solverseitigem Massenaufschlag auf 1350 kg gesetzt. Die Elementgröße des graphenbasierten Modells wird auf 10 mm gesetzt. Die Fragestellung konkretisiert sich für diesen Anwendungsfall auf den Bereich hinter dem vorderen Stoßfänger. Für das Optimierungsszenario werden insgesamt 5 Lastfälle erstellt. Darunter werden drei dynamische Crashlastfälle und zwei statische Lastfälle mit linear elastischem Materialverhalten definiert. Zur Layout Findung im Bereich hinter dem Stoßfänger werden durch die drei Crashlastfälle unterschiedliche Deformationsreaktionen geprüft. Der erste Lastfall stellt einen Frontalaufprall mit einer starren Wand und 100 % Überdeckung. In diesem Lastfall wird eine Anfangsgeschwindigkeit von 50 km/h definiert. Im zweiten simulationsbasierten Crashtest (*ODB – Offset Deformable Barrier*) wird eine deformierbare Barriere mit einer Überdeckung von 40 % in abstrahierter vereinfachter Form verwendet. Hier erhält das Fahrzeug eine Anfangsgeschwindigkeit von 64 km/h . Aktuellere ODB-Barriere werden in beweglicher Form ausgeführt. Der dritte Crashlastfall stellt einen *Small Overlap* dar, ebenfalls mit 64 km/h und einer Überdeckung von 25 %. Für die zwei linear statischen Lastfälle mit elastischem Materialverhalten wird ein Torsions- und ein Biegelastfall definiert, die für ein gewisses Steifigkeitsniveau sorgen sollen. Die Lasteinleitung und Auflagerdefinitionen liegen an den Dämpferpositionen. Für den Biegelastfall werden Kräfte im Bereich der Insassenzelle aufgegeben. In Tabelle 9.11 ist eine Übersicht dargestellt.

Für die drei Crashlastfälle werden eine Reihe von Punkte im Unterboden für den Optimierungsprozess betrachtet und als Werte verschiedener Größen zur Bewertung herausgeschrieben. Generell erfolgt in den Crashlastfällen die Auswertung direkt an mitsimulierten

Tabelle 9.11: Lastfallkatalog – Verwendete Lastfälle zur Layout Findung des Vorderwagens

Ausgangsbild	Deformationsbild	Lastfallinformationen
		<p>LF1 <i>Frontalaufprall</i> Euro NCAP/UNR137 100 % Überdeckung starre Wand $v_0 = 50 \text{ km/h}$ LS-DYNA <i>explizit</i></p>
		<p>LF2 <i>ODB</i> Euro NCAP/UNR94 40 % Überdeckung deformierbare Barriere $v_0 = 64 \text{ km/h}$ LS-DYNA <i>explizit</i></p>
		<p>LF3 <i>small overlap</i> Euro NCAP/UNR94 25 % Überdeckung starre Barriere $v_0 = 64 \text{ km/h}$ LS-DYNA <i>explizit</i></p>
	 <p>■ max. Verschiebung □ min. Verschiebung</p>	<p>LF4 <i>Biegelastfall</i> statischer Ersatzlastfall Lasteinleitung $4 \times F$ $F = 6000 \text{ N}$ LS-DYNA <i>implizit</i></p>
	 <p>■ max. Verschiebung □ min. Verschiebung</p>	<p>LF5 <i>Torsionslastfall</i> statischer Ersatzlastfall Lasteinleitung $2 \times F$ $M_t = 3000 \text{ Nm}$ LS-DYNA <i>implizit</i></p>

Dummys, wie einem *THOR Hybrid III, 50th percentile Male*, dieser repräsentiert den Anteil an Fahrern, die kleiner sind als dieser *Dummy*. Bei dieser Art der Auswertung handelt es sich um einen Vorschlag und die Bewertung muss nicht zwingend wie gezeigt erfolgen. Die Wahl der Punkte und die Art der Auswertung hat einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Ergebnisse des Optimierungsprozesses. Die Strategien sollten nach Möglichkeit mit nachfolgenden Entwicklungsprozessen oder gar Versuchsständen für eine reale Testabdeckung, wie zum Beispiel einer Schlittentestanlage, abgestimmt werden. Die Abstimmung soll Rückschlüsse auf die Auswertung erfahrungsbasiert für das Stadium der Konzeptphase bieten. Für den OLC (*Occupant Load Criterion*) werden die Punkte 1 bis 6 (siehe Abb. 9.30) verwendet und mittels Batch-Skript und dem *Post-Processing-Tool Animator₄* von *GNS mbH* gemittelt ausgewertet. Zusätzlich könnten auch Punkte im Bereich der B-Säule

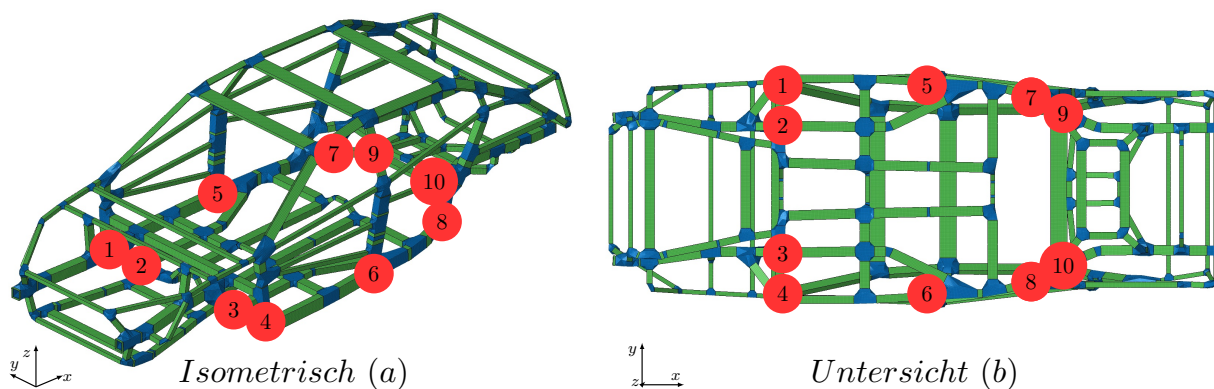


Abbildung 9.30: Zeigt die Auswertungspunkte im Bereich des Unterbodens für die Crashlastfälle – Punkte 1 bis 6 werden für das OLC verwendet; Punkte 3 und 10 werden für die Intrusion der Insassenzelle herangezogen; die Verschiebung als zurückgelegter Weg entgegen der X-Richtung wird mittels Punkt 8 gemessen

oder im Bereich des Daches nah am Insassenkopf zur Ermittlung herangezogen werden. Für die Detektierung des zurückgelegten Wegs in X-Richtung wird der Punkt 8 verwendet. Die maximalen Verschiebungen entgegen der X-Richtung variieren für verschiedene Punkte im hinteren Modell minimal, sodass der Punkt 8 auf der Fahrerseite bzw. auf der Seite der Barrieren ausgewählt wird. Die Intrusion in die Insassenzelle wird zwischen den Punkten 10 und 3 als Distanzreduktion gebildet und zur Auswertung im Prozess verwendet. Abbildung 9.31 zeigt die Auswertung der zwei statischen Lastfälle. Im Torsionslastfall wird die Torsionssteifigkeit bewertet. Dazu leiten zwei Kräfte im vorderen Bereich an den Dämpferpunkten ein resultierendes Drehmoment M_t ein. Die eingeleitete Verdrehung erzeugt zwei Winkel α_1 und α_2 (siehe 9.31 (a)), die zur Berechnung gemittelt werden. Die Torsionssteifigkeit ermittelt sich in diesem Szenario mit:

$$\text{Torsionssteifigkeit} = \frac{M_t}{\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right)} \quad (9.1)$$

Im Biegelastfall wird entsprechend eine Biegesteifigkeit zur Bewertung ermittelt. Dazu wird

die maximale Auslenkung im Bereich des Unterbodens nah der B-Säule detektiert. Über die Summe der eingeleiteten Kräfte wird die Biegesteifigkeit wie folgt gebildet:

$$\text{Biegesteifigkeit} = \frac{\sum F_i}{u_{z,max}} \quad (9.2)$$

Für das initiale Modell (siehe Abbildung 9.32), wird ein Strukturrahmen entsprechend dem vorhandenen Designraum gebildet. Die Form ergibt sich aus benötigten Anbindungspunkten für den Stoßfänger und den Anbindungspunkten des abstrahierten Fahrwerks und werden mit initialen Profilen verbunden. Die äußeren Profile werden mit einer Kantenlänge von 70 mm vorgegeben und zusätzlich wird eine Querstrebe mit einer Kantenlänge von 30 mm vorgegeben. Die Querstrebe soll für mehr Anbindungspunkte sorgen und den Rahmen initial schließen.

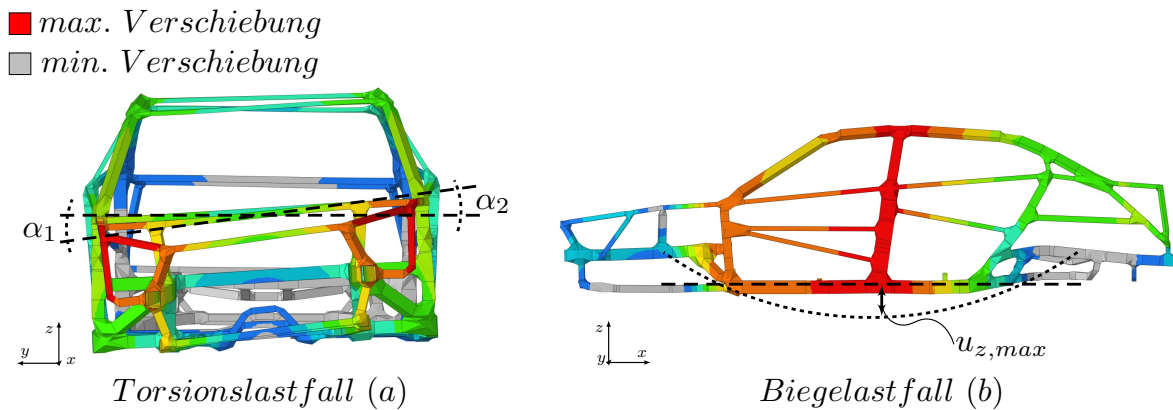


Abbildung 9.31: Zeigt die Auswertungspunkte für die zwei statischen Lastfälle – Torsionsmoment, ermittelt an den Punkten der Lasteinleitung, 20% erhöhte Darstellung (a); Biegelastfalls, ermittelt anhand maximaler Verschiebung (b)

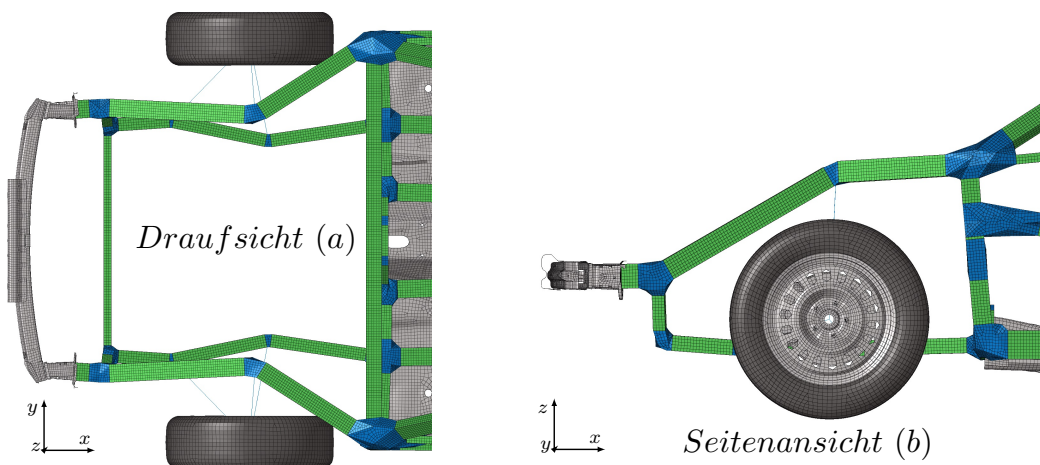


Abbildung 9.32: Draufsicht des initialen Designs zur Layout Findung (a) und Seitenansicht des initialen Designs zur Layout Findung (b) des Bestehende Anbindungspunkte wurden dazu als Vorgabe direkt verbunden

9.4.1 Minimiere die Kontaktkraft

Zur Layout Findung wird das initiale Modell mit den in Tabelle 9.12 aufgezählten Spezifikationen mit dem GHT3D-Prozess gestartet. In diesem Szenario werden die fünf Lastfälle aus Tabelle 9.11 eingebunden. Die Intrusion in die Insassenzelle wird mit 50 mm eingeschränkt,

Tabelle 9.12: Ziel und Restriktionen – Kontaktkraftminimierung zur Layout Findung im Bereich des Vorderwagens; LF steht für Lastfall

Ziel	Restriktionen
Minimiere die Kontaktkraft (Gemessen durch die Summe der maximal auftretenden Kontaktkräfte in den Interfaces LF1-3)	Verbindungswinkel $\geq 15^\circ$ Symmetrie $XZ - Ebene$ Maximale Wandstärke 15 mm Minimale Wandstärke 1 mm Intrusion LF1 $\leq 50\text{ mm}$ Intrusion LF2 $\leq 50\text{ mm}$ Intrusion LF3 $\leq 50\text{ mm}$ Verschiebung LF1 $\leq 1300\text{ mm}$ Verschiebung LF2 $\leq 1300\text{ mm}$ Verschiebung LF3 $\leq 1300\text{ mm}$ OLC LF1 $\leq 30\text{ g}$ OLC LF2 $\leq 30\text{ g}$ OLC LF3 $\leq 30\text{ g}$ Biegesteifigkeit LF4 $\geq 48000 \frac{N}{mm}$ Torsionssteifigkeit LF5 $\geq 25000 \frac{Nm}{grad}$

mit dem Ziel die Insassenzelle zu erhalten. Der OLC-Wert wird für die Lastfälle auf 30 g restringiert. Der Abstand von der Barriere bis hin zur Insassenzelle beträgt ca. 1400 mm . Die Verschiebung des Modells wird entsprechend auf 1300 mm beschränkt, damit soll ein Deformationsbereich definiert werden. Die Verschiebung aus Lastfall 3 wird ausgelesen, aber nicht bewertet. Insgesamt werden 4 geometrische und 10 simulative strukturmechanische Restriktionen berücksichtigt. Das initiale Design hält bereits einige Restriktionen ein und das Verfahren soll das Layout des vorderen Bereichs manipulieren und mittels Wandstärkenevaluation in der inneren Optimierungsschleife weiter verbessern. Die Schwierigkeit liegt in der Einhaltung von gegenläufigen Restriktionen. Die Reduktion von Verschiebungen benötigen eine Steigerung der Struktursteifigkeit, wohingegen die Einhaltung der OLC-Grenzen eine gewisse Nachgiebigkeit oder viel mehr weichere Strukturen voraussetzt. In Abbildung 9.33 zeigt einen Optimierungsverlauf, der in einem zulässigen Design endet.

	<i>Draufsicht</i>	<i>Seitenansicht</i>
<p><i>Iteration 1</i> <i>Zielfunktionswert : 4317614.0N</i> <i>Constrait violation: 43.57%</i></p>		
<p><i>Iteration 2</i> <i>Zielfunktionswert : 2892394.8N</i> <i>Constrait violation: 4.72%</i></p>		
<p><i>Iteration 3</i> <i>Zielfunktionswert : 3137731.8N</i> <i>Constrait violation: 1.67%</i></p>		
<p><i>Iteration 4</i> <i>Zielfunktionswert : 3483514.5N</i> <i>Constrait violation: 0%</i></p>		
<p><i>Iteration 5</i> <i>Zielfunktionswert : 2973007.8N</i> <i>Constrait violation: 0%</i></p>		
<p><i>Iteration 6</i> <i>Zielfunktionswert : 3118350.5N</i> <i>Constrait violation: 1.26%</i></p>		

Abbildung 9.33: Zeigt die einzelnen Entwürfe durch die Iterationen 1 bis 6 zu einem finalen Entwurf in Iteration 5. Die ersten zulässigen Entwürfe entstehen ab Iteration 4.

Tabelle 9.13: Ziel- und Restriktionswerte im Vergleich – Referenzmodell, initiales Modell und finaler Entwurf. Der Zielfunktionswert bildet sich aus der Summer der maximalen Konaktkräfte aus den Lastfällen 1 bis 3.

Ziel & Restriktionen		ref. Modell	Iteration 0 init. Modell	Iteration 5 finaler Entwurf
Σ max. Kontaktkräfte	minimieren \downarrow	$3.21 \cdot 10^6 N$	$4.83 \cdot 10^6 N$	$2.97 \cdot 10^6 N$
Verbindungswinkel	$\geq 15^\circ$	✓	✓	✓
Symmetrie	XZ -Ebene	✓	✓	✓
Wandstärke	$15 \geq x \geq 1 mm$	2 mm	1 mm	2.26 mm
Intrusion LF1	$\leq 50 mm$	4.66 mm	4.48 mm	25.33 mm
Intrusion LF2	$\leq 50 mm$	28.70 mm	$4 \cdot 10^{-4} mm$	0.76 mm
Intrusion LF3	$\leq 50 mm$	26.54 mm	25.27 mm	$1 \cdot 10^{-4} mm$
Verschiebung LF1	$\leq 1300 mm$	630.62 mm	915.26 mm	625.72 mm
Verschiebung LF2	$\leq 1300 mm$	1379.43 mm	1968.46 mm	1297.61 mm
Verschiebung LF3	$\leq 1300 mm$	946.16 mm	928.13 mm	1021.76 mm
OLC LF1	$\leq 30 g$	31.02 g	18.34 g	27.68 g
OLC LF2	$\leq 30 g$	23.25 g	17.15 g	24.20 g
OLC LF3	$\leq 30 g$	33.12 g	38.92 g	23.41 g
Biegesteifigkeit LF4	$\geq 48000 \frac{N}{mm}$	99173.55 $\frac{N}{mm}$	60453.40 $\frac{N}{mm}$	100208.76 $\frac{N}{mm}$
Torsionssteifigkeit LF5	$\geq 25000 \frac{Nm}{grad}$	46581.50 $\frac{Nm}{grad}$	31871.60 $\frac{Nm}{grad}$	35403.80 $\frac{Nm}{grad}$

Das initiale Modell hat eine Restriktionsverletzung von insgesamt 81.15% (*constraint violation*). In dieser Anwendung werden die Entwürfe nach der *constraint violation* sortiert, bis zulässige Entwürfe entstehen. Die *violation* bildet sich aus der Summe des prozentualen Abstands von restringierten Werte zur Restriktionsgrenze. Für jeden Entwurf werden 5 Lastfälle berechnet und auf Basis der erzeugten Daten wird der Designraum im vorderen Bereich manipuliert. Bereits Iteration 3 führt zu einer recht guten Lösung mit einer Abweichung der Restriktionsgrenzen von 1.67%. Die ersten zulässigen Entwürfe entstehen in Iteration 4. Das Ergebnis aus Iteration 5 erzeugt in Summe geringere Kontaktkräfte als im Vergleich zu dem Referenzmodell und dem initialen Modell. Aus geringeren Kontaktkräften resultieren bei Einhaltung der zulässigen Verschiebung geringere OLC-Werte. Die Eigenschaften konnten insgesamt deutlich verbessert werden. In Iteration 6 steigt die Summer der maximalen Kontaktkräfte bei gleichzeitiger Abweichung der Restriktionsgrenzen wieder an. Bei der Verwendung mehrerer Lastfälle sind meisten nicht alle Lastfälle vom Schwierigkeitsgrad her gleich verteilt. Als dominant wirkender Lastfall stellt sich hier *ODB*-Lastfall (LF2) mit einer Verschiebung von 1297.61 mm heraus, welcher nah an der Restriktionsgrenze verläuft. Die Deformationsbilder der drei Crashlastfälle des Entwurfs aus Iteration 5 sind in Abbildung 9.34 bis 9.36 dargestellt. Dabei ist der Unterschied zwischen den Anforderungen an Lastfall 1 und Lastfall 2 und den Deformationsreaktionen ersichtlich. Für Lastfall 1 wirkt die Struktur sehr steif mit weniger Deformation als im Vergleich zu Lastfall 2, bei dem mehr Deformationsweg genutzt und deutlich mehr deformiert wird. Lastfall 2 besitzt eine deutlich

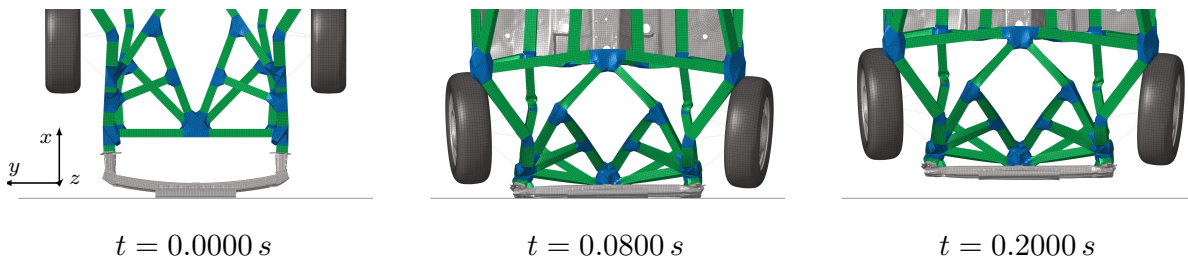


Abbildung 9.34: LF1 – 100% Überdeckung starre Wand, Ausschnitt aus Deformationsanimation des finalen Entwurfs aus Iteration 5

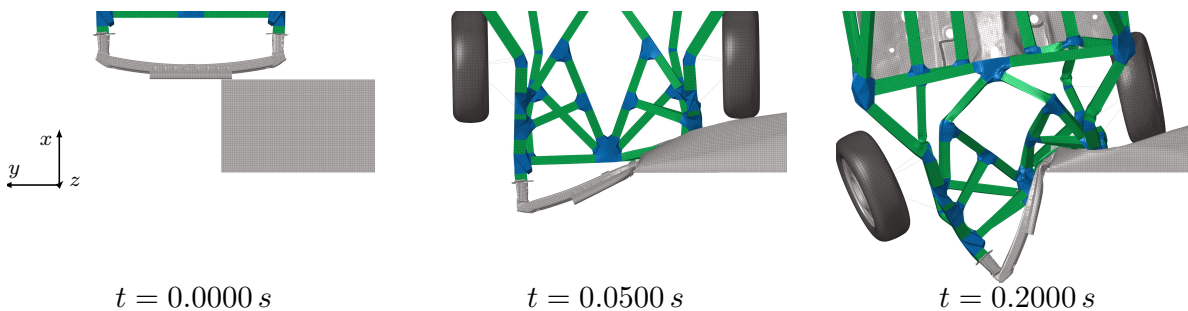


Abbildung 9.35: LF2 – 40% Überdeckung *ODB*, Ausschnitt aus Deformationsanimation des finalen Entwurfs aus Iteration 5

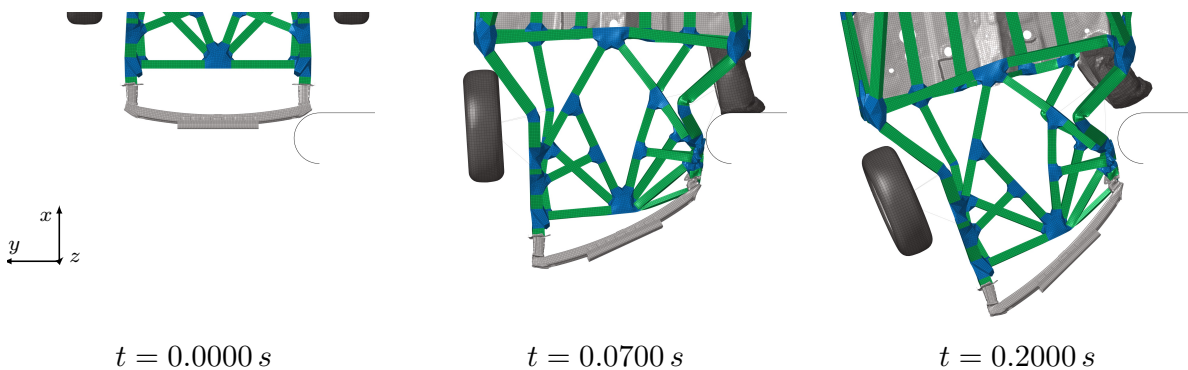


Abbildung 9.36: LF3 – 25% Überdeckung starre Barriere *small overlap*, Ausschnitt aus Deformationsanimation des finalen Entwurfs aus Iteration 5

höhere Anforderung durch eine höhere initiale Geschwindigkeit und weniger zur Verfügung stehender projizierter Aufprallfläche. Lastfall 3 stellt erhöhte Anforderungen an die Insassenzellen im Bereich A-Säule und der Unterbodenpartie, als an die Layoutstruktur im vorderen Bereich. In Abbildung 9.37 sind die Kraft-Weg-Verläufe zwischen finalen Entwurf aus Iteration 5 und dem ref. Modell im direkten Vergleich abgebildet. Hier ist ersichtlich, dass die maximale Kontaktkraft reduziert werden konnte, welche zu niedrigeren OLC-Werten führt. Im Verhalten ist eine nahe zweistufige Energieabsorption ersichtlich, wobei die zweite Stufe hinter dem Stoßfänger nur teilweise genutzt wird. Abbildung 9.38 zeigt den Vergleich zwischen ref. Modell und finalen Entwurf aus Iteration 5 für Lastfall 2.

Hier wird der zulässige Deformationsweg voll ausgenutzt, was ein Indiz dafür ist, dass es sich

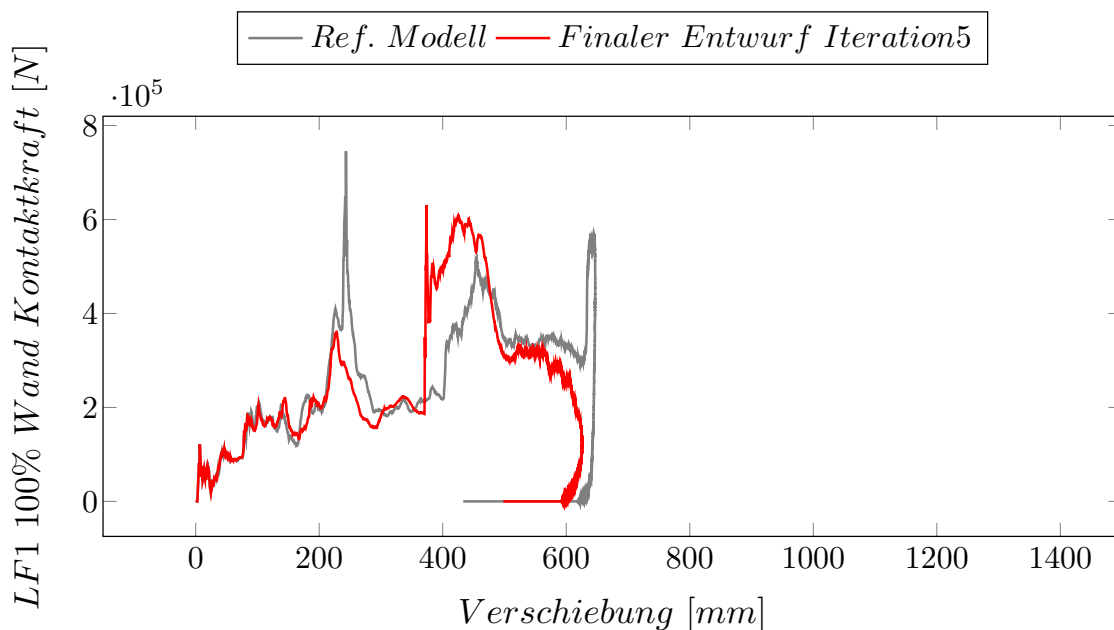


Abbildung 9.37: LF1 – Kraft-Weg-Verläufe zwischen ref. Modell und finalem Entwurf aus Iteration 5 bei 100% Überdeckung starre Wand

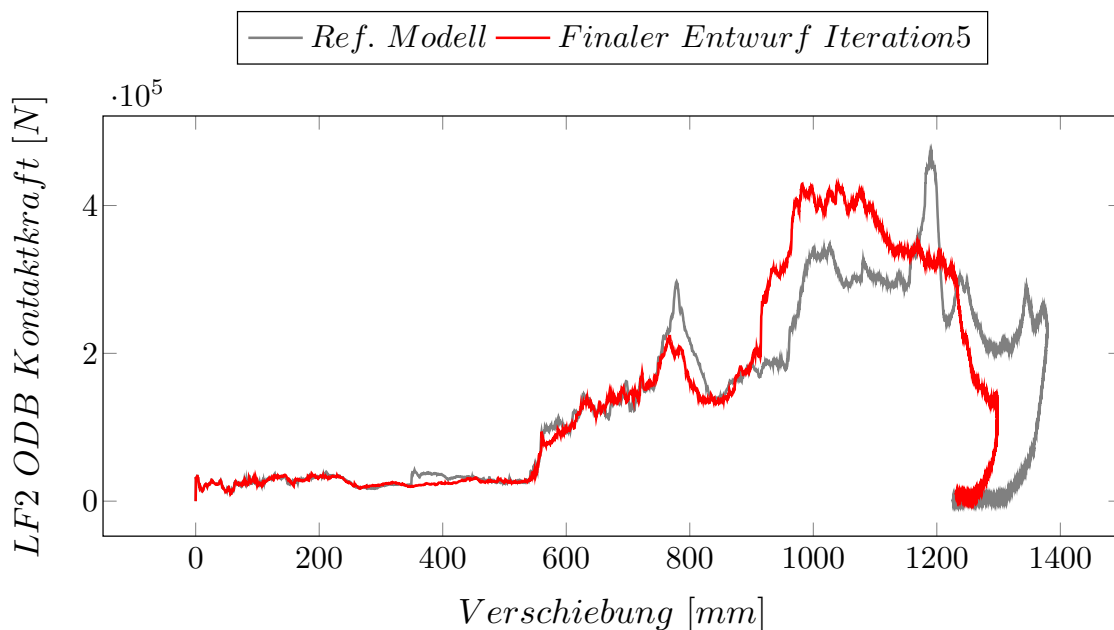


Abbildung 9.38: LF2 – Kraft-Weg-Verläufe zwischen Ref. Modell und finaler Entwurf aus Iteration 5 bei 40% Überdeckung ODB

um einen der dominanteren Lastfälle handelt. Im Energieabsorptionsverhalten sind auch hier die zwei Niveaustufen ersichtlich. Die Stufen spiegeln das Verhalten der Komponente im vorderen Bereich wieder. Die erste Stufe resultiert aus der Deformationsreaktion des Stoßfängers und die Zweite Stufe resultiert aus dem Deformationsverhalten der graphenbasierten Profilstruktur. Die zweite Stufe ist deutlich besser genutzt als im Vergleich zum graphenbasierten Referenzmodell. Abschließend sind in Abbildung 9.39 weitere alternative

Layouts aus dem Entwicklungs- und Optimierungsprozess gezeigt, welche die Restriktionen erfüllen. Diese weiteren Strukturen zeigen, dass auch in diesem Beispiel eine Auswahl von mehreren Lösungen im Verfahren mit ggf. teils besseren oder teils verbesserungswürdigen Eigenschaften entstehen.

	<i>Draufsicht</i>	<i>Seitenansicht</i>
<p><i>Iteration 6</i> <i>Zielfunktionswert : 2992030.0N</i> <i>Constrait violation: 0%</i></p>		
<p><i>Iteration 6</i> <i>Zielfunktionswert : 3030347.5N</i> <i>Constrait violation: 0%</i></p>		
<p><i>Iteration 7</i> <i>Zielfunktionswert : 3235761.1N</i> <i>Constrait violation: 0%</i></p>		

Abbildung 9.39: Im Optimierungslauf entstandene Zwischenentwürfe

9.4.2 Diskussion

Das Modell ist mit Verbrennungsmotor und Kardantunnel ausgeführt. Die aufgezeigte Vorgehensweise lässt sich auf modernere Fahrzeugkonzepte mit beispielsweise zweiter Lastebene im vorderen Bereich zu Lasteinleitung übertragen. Die erzeugten Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Vorgehensweise zu Strukturen führt, die in 5 verschiedenen industrierelevanten Lastfällen, 14 geforderte Restriktionen erfüllen. Das initiale Modell befindet sich im nicht zulässigen Bereich und wird iterativ verbessert. Besonders hervorzuheben ist die Berücksichtigung von Plastizität, Dehnratenabhängigkeiten und Versagen in den Materialmodellen. Jedoch besitzt das initiale Modell einen wesentlichen Einfluss auf den Ausgang des Verfahrens. Das initiale Modell resultiert in diesem Beispiel aus den Anbindungspunkten von Stoßfänger und Reifen. Als alternative könnten auch schon zu Beginn geradlinigere Längsträger ähnlich Strukturen vorgegeben werden, um mittels GHT3D weitere mechanisch gerechte stützende Elemente hinzuzufügen.

Grundsätzlich sollen die Ergebnisse in der Konzeptphase wegweisende Richtungen vorgeben. Zwar werden wichtige simulative Phänomene, wie Versagen, Kontakt, Knicken, Beulen oder Materialwechsel ermöglicht, doch ist der Detailgrad für die adäquate Vorschlagsgenerierung noch zu gering. Als Erweiterung sollten detailliertere Verbindungsmodellierungen erfolgen und offene Strukturteile sollten mit Schubfeldern geschlossen werden, um mehr Schubsteifigkeiten zu erzeugen. Außerdem sollten weitere wichtige Aggregate oder Non-Design-Räume simulativ berücksichtigt werden. Ein wichtiges Phänomen in diesem Zusammenhang ist das *Stacking* des Areal, denn viele Komponente sorgen beim Crash für einen Blockzustand, welche die prinzipielle Auslegung erschwert. Bisher lassen sich lediglich Non-Design-Räume berücksichtigen, in denen sich keine Strukturen bilden dürfen. Diese sind aber nicht physisch in der Simulation enthalten. Dazu sind weitere Untersuchungen erforderlich, wie diese Berücksichtigt werden können.

Die verschiedenen Anforderungen an den vorderen Bereich des Fahrzeugs mit Crashdosen und Stoßfänger führen derzeit zu Konzepten mit längsträgerartigen Gebilden, denn eine direkte Verbindung von Stoßfänger zur Insassenzelle scheint dabei plausibel. Weiterhin werden derzeit Verprägungsmuster zur gezielten Deformation vom beispielsweise Längsträger eingesetzt, um lokale Deformationen zu initiieren (*triggern*).

Der Einfluss auf LF3 (*small overlap*) durch Manipulation des Modells ist gering. Für die weitere Verwendung sollte Versagen der Reifenanbindung abgebildet werden, damit ein Abreißen und Abgleiten des Modells an der Barriere ermöglicht wird. In diesem Modell wird das Fahrwerk als möglicher Designraum integriert.

In der realen Fahrzeugentwicklung ist das Fahrwerk nicht Teil des Deformationsraums zur Energieabsorption. Zur zukünftigen Layout Findung muss der Designraum weiter geschärft werden.

Als eine weitere grundlegende Änderung könnte auch ab dem Bereich der Insassenzelle ein vollwertiges Gesamtfahrzeugmodell verwendet werden, bei dem ein initialer graphenbasierter Rahmen im vorderen Bereich angebunden ist, denn dann hält ein größerer Teil des Modells schon eine Reihe von Anforderungen ein.

10 Kritik, Diskussionspunkte und Ausblick

In diesem Kapitel werden einige Diskussionspunkte aufgegriffen, die während der Entwicklung und Anwendung der Methode aufgefallen sind. Das beinhaltet einige Gedanken, die eine gewisse Vielschichtigkeit vom Problematiken schildern. Automatisierte Verfahren zur Optimierung von Crashstrukturen befinden sich im Spannungsfeld zwischen Finden von Optima bei komplexen Zusammenhängen, Robustheit, Fertigbarkeit und auf der anderen Seite der Ressourcenverbrauch auf der HPC-Infrastruktur.

10.1 Finden von Optima in der heuristikbasierten Optimierung und komplexe Zusammenhänge von Variablen

Die Frage, ob der Prozess das globale Optimum findet, wird in dieser Arbeit eher vernachlässigt. Aus mathematischer Sicht findet hier streng genommen keine Optimierung statt. Viele mathematische Verfahren setzen ein konvexes Problem voraus und hier lässt sich entsprechend sagen, dass ein Optimum unter Zuhilfenahme von Optimalitätskriterien gefunden wird bzw. bewiesen wird. Viele reale Problemstellungen halten nicht-konvexe Probleme bereit. Bei technischen Problemstellung ist der Begriff Optimierung in der Produktentwicklung breit gefächert, kleine Verbesserungen durch Veränderungen von Parametern für definierte Anforderungen können schon Optimierungen der Produkteigenschaften dar stellen. Zur Beendigung des Optimierungsprozesses der GHT3D werden Abbruchkriterien eingesetzt. Dazu zählt eine bestimmte Anzahl an Iteration als Grenze oder die Optimierung wird beendet, wenn keine Verbesserungen mehr erzielt werden, ähnlich wie bei SRSM-Verfahren oder evolutionären Algorithmen. Bei nicht-konvexen Problemstellungen gestaltet sich die Bewertung eben schwieriger. Hier kann oft davon ausgegangen werden, dass sich die gefundene Lösung in einem sogenannten lokalen Optimum befindet. Aus technischer Sicht liefern dann Verfahren wie SIMP, (siehe Kapitel 3.4) zwar mathematisch begründbare Resultate aber oft erst ohne Lösung (ohne technische Umsetzbarkeit). Auch hier kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass die Lösungen lokale Optima sind. Weiterhin werden noch Heuristiken, wie beispielsweise Bestrafung oder Filter eingesetzt, um das Ergebnis noch weiter nachzubehandeln bzw. zu beeinflussen. Außerdem wird die SIMP-Methode zur Auslegung für Strukturen mit linear-statischen Belastungen und kleinen Verschiebungen eingesetzt und kann für hoch-

gradig dynamische Lastfälle nicht eingesetzt werden. Die alleinige Anforderung, dass ein Verfahren besser funktioniert, durch die Verwendung von Sensitivitäten, reicht eben bisher noch nicht aus. Einer der großen Nachteile entsteht dadurch, dass man sich eben nicht sicher sein kann, die „beste“ Lösung ermittelt zu haben. Im Verfahren der GHT3D wird versucht durch geschicktes Abtasten des komplexen hochdimensionalen Designraums mit einer langen Liste an nicht-linearen Zusammenhängen und begrenztem Wissen, Lösungen zu generieren. In dieser Arbeit werden Ergebnisse akzeptiert, die sehr nah an einer idealen Energieabsorption liegen. Dabei sollte beispielsweise die Kraft-Weg-Verhaltenskurve einen annähernd rechteckigen Verlauf ausbilden und damit eine Lösung darstellen, die ziemlich nah an einem nachvollziehbaren theoretischen Optimum liegt, siehe Kapitel 2.2 und 9.2.1. In den vorgestellten Demonstrationsbeispielen, liegen oft mehrere Entwürfe von den Eigenschaften her in Bezug auf die Energieabsorption nah beieinander, wobei die Masse der Strukturen sich stark unterscheiden kann. Die Masse könnte durch zusätzliche einbezogen werden, indem die Energieabsorption beispielsweise pro Gewichtseinheit restringiert wird. In der Regel tendieren die erzeugten Strukturen zu schwereren Massen. Aus mechanischer Sicht unterliegen die Rahmenmodelle erschwerten Bedingungen zur Energieabsorption, weshalb der strukturelle Aufbau der mechanischen Strukturen diskutiert werden sollte.

10.2 Aufbau der mechanischen Struktur

Strukturen mit guten bis sehr guten Energieabsorptionseigenschaften, können aus mechanisch technischer Sicht, metallurgisch erzeugte schaumartige Gebilde sein, die flexibel verschiedene Bauräume befüllen können. Die Absorption geschieht durch irreversible Deformation und lokales Versagen des porösen Metalls. Durch die sehr kleinen und sehr lokalen Deformationsvorgänge können sehr glatte bzw. ruhige Entschleunigungen erzielt werden. Doch Schaum als Crashabsorber bringt Schwierigkeiten bei der Abbildbarkeit in Simulationsmodellen mit sich und erschwert die Prognosefähigkeit. Außerdem besteht bei Schäumen aufgrund der großen Oberfläche eine erhöhte Neigung zur Oxidation. Eine weitere Möglichkeit zur guten Energieabsorption, ist die initiierte Deformation bei dünnwandigen Blechstrukturen, welche auch den derzeitigen Stand der Technik bei der Auslegung von Crashelementen im vorderen Fahrzeugbereich darstellt. Die Prognosefähigkeit bei fast homogenen isotropen Blechstrukturen oder Strangpressprofilen, ist ebenfalls mit einem erhöhten Schwierigkeitsgrad behaftet. Durch gezielte Schwächung dieser Homogenität, durch beispielsweise Falthilfen, kann die Prognosefähigkeit gesteigert werden. Im Resultat sollten die Strukturen idealerweise immer in gleicher Weise deformieren. Dazu zählen Verprägungen verschiedener Formen oder Schwächungen in Form von Löchern an den Strukturecken oder in den Flächen. Durch die gezielte Schwächung kann auch Einfluss auf das Kraftniveau bei der Energieabsorption genommen werden. Zwar kann die Energieabsorption durch Falten und Beulen bezogen auf das Strukturgewicht im hohen Maß gut geeignet sein, wobei das Kraftniveau über den Deformationsweg betrachtet, stark um den Verlauf des theoretischen Optimums oszillieren kann. Dies ist auf die Deformationsart zurückzuführen, welche mittels jeder Falte, am

Schluss der plastischen Deformation mit niedrigerem Widerstand, ein Tal im Kraftverlauf generieren kann. Das Verfahren der GHT3D ist mit dreidimensionalen Rahmenstrukturen und verschiedenen Verstrebungen im direkten Vergleich bei der Energieabsorption unter Einbezug der Strukturmasse bedingt bis gar nicht konkurrenzfähig. Die Mechanismen zur Energieabsorption prägen sich weniger durch lokale Effekte aus, sondern eher durch eine Reihe von global ausknickenden Streben oder Profile. Zwar werden im Verlauf der Optimierung die Streben von der technischen Länge im Durchschnitt immer kürzer, welches dadurch eine sinkende Knickneigung mit sich bringt, dennoch kann Knicken von Profilen oder Streben im Deformationsprozess auftreten. Das reine Ausknicken eines Strukturelements aufgrund von Stabilitätsverlust, ist eine der am wenigsten geeigneten Mechanismen zur Energieabsorption. Die Schwierigkeit liegt hier in der grundlegenden Form der Profile, wie sie in dieser Arbeit ausgeführt sind, geometrisch wesentlich länger als breit und hoch. Diese Ausführung erlaubt zum einen sehr filigrane Strukturen innerhalb eines Bauraums, aber zum anderen bringt diese Form eine natürliche hohe Knickneigung oder Durchbiegung mit sich. Wenn die Anordnung der Streben so gestaltet ist, dass sich im überwiegenden Teil der Strukturelemente Biegebelastungen einstellen, können in Folge dessen sehr glatte Kraft-Weg-Verläufe entstehen. Die Energieaufnahme mit Biegeverhalten kann zwar für glattere Kraft-Weg-Verläufe sorgen, benötigt auf der anderen Seite aber mehr Masse als im Vergleich zu Falt- und Beulmechanismen einzelner dünnwandiger Bleche. Für die bessere Energieabsorption müssen weitere Trigger bzw. Verprägungen in die Rahmenstrukturen eingebracht werden, um vom globalen Ausknicken zu lokaleren Falten- und Beulen überzugehen. Denn die Profile stellen grundsätzlich dünnwandige Strukturen dar.

10.3 Robustheit der mechanischen Modelle

Die Robustheitsbewertung von Strukturen stellt einen wichtigen Zweig in der Entwicklung und Abschätzbarkeit von Eignung für gestellte Anforderungen dar. Dieses Thema ist nah mit den Struktureigenschaften verbunden bzw. abhängig von den gefundenen Strukturmechanismen. Eine Robustheitsanalyse wird in dieser Arbeit nicht durchgeführt und stellt im Grunde ein eigenes Gebiet dar und muss noch zwingend erfolgen. Grundsätzlich kann bei allen dünnwandigen mechanischen Simulationen mit explizitem Solver eine Unrobustheit hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften unterstellt werden, bis das Gegenteil bewiesen wird. Dieser Begleitumstand betrifft alle Entwicklungsingenieure, die sich mit der Auslegung von Strukturen in dieser Thematik beschäftigen. Auf der einen Seite lassen sich Verfahren finden, die zur Strukturfindung eingesetzt werden und auf der anderen Seite existieren Verfahren zur Bewertung der Machbarkeit oder Fähigkeit zu prognostizierten Struktureigenschaften. Die Eigenschaften können hinsichtlich von Materialschwankungen, Variation der Lasteinleitung oder Variation einzelner Parameter der Struktur selbst infolge von Fertigungsschwankungen untersucht werden. Bei moderater Variation dieser Parameter sollen dennoch geforderte Eigenschaften stets erfüllt werden. Auch in der Vielzahl von Entwürfen, die in dieser Arbeit erzeugt wurden, finden sich vermutlich Entwürfe mit unrobuste Struktureigenschaften. Die

eingesetzten Profile müssten sonst immer in gleicher Weise knicken, bzw. sich in die gleiche Richtung deformieren. Erschwerend kommen noch Unsicherheiten durch die Numerik oder des Prozesses selbst hinzu. Die Abmilderung von stark sensitiven Änderungen auf eine Struktureigenschaft, kann beispielsweise mit umfangreichen Korrelationstabellen (hoher Ressourcenaufwand) begegnet bzw. analysiert werden. Zur Entwicklung bzw. Auslegung bleibt nur noch übrig, sich mit markanten oder dominanten mechanischen Mechanismen auseinander zu setzen, die unempfindlich gegen Schwankungen oder moderat geringen Änderungen von Parametern sind. Dazu zählen beispielsweise, wie im Abschnitt zuvor erwähnt, durchdachte Verprägungsmuster für dünnwandige Strukturen, um ein dominantes Deformationsverhalten zu erzeugen. Ein Beispiel dazu stellt die Crashdose des Honda Accords 2017 dar (siehe Kapitel 2.3, Abb. 2.3). Das Verprägungsmuster ist so angelegt, das auch bei moderater Änderung der Länge, Breite und Höhe, als auch der Wandstärke, ein annähernd gleiches Verhalten im Deformationsbild auftritt. Zwar variiert das Niveau der aufgenommenen Energie entsprechend bei Stärkung oder Schwächung der Wandstärke, dennoch ist eine gewisse Prognosesicherheit durch gleiches Deformationsverhalten gegeben. Diese Problematik wirft ein Spannungsfeld zwischen Prognosegüte und Optimalität auf.

10.4 Die verwendeten Heuristiken

Die eingesetzten aktiven Heuristiken in dieser Arbeit erzeugen nur einen Bruchteil der theoretisch möglichen topologischen Varianten. Dies lässt unter Umständen weiteres ungenutztes Verbesserungspotential offen, welches über neue Heuristiken ausgenutzt werden kann. Weiterhin besagt eine Annahme, dass die besten Ergebnisse ohne jegliche Restriktion, wie beispielsweise Symmetriebedingungen, erzeugt werden. Besonders bei der Deaktivierung von Symmetrie, erzeugt das Verfahren aber keine wertvoll anmutenden Strukturen. Die Streben oder Profile würden unstrukturiert durch den Bauraum erzeugt und zu stark überkreuzenden Entwürfen führen. Der Entwurfsraum zur topologischen Manipulation ist in den Anwendungsbeispielen deutlich zu komplex für das Verfahren und muss deshalb mit Restriktionen beschränkt bzw. der Komplexitätsgrad stark reduziert werden. Weiterhin lässt diese Annahme zu, dass jede Restriktion den Designraum einschränkt und jede Einschränkung sollte dann auch zu schlechteren Ergebnissen führen.

Die Heuristiken sind keinesfalls allgemein gültig. Besonders bei den dreidimensionalen Fällen findet sich für jede einzelne Regel leicht ein Konterfall. Die aufgestellten Regeln lassen sich zwar für verschiedene Fälle meistens leicht entkräften, aber genauso lassen sich für die aufgestellten Regeln Fälle finden, in denen hervorragende Ergebnisse erzielt werden können. Die Heuristiken legitimieren sich durch Beteiligung an besten Entwürfen für ein Ziel. Diese losgelöste Eigenschaft erzeugt eine gewisse Flexibilität für verschiedene Lastfälle oder verschiedene Ziele. Weiterhin wird der Nachteil der fehlenden Allgemeingültigkeit durch den Vergleich von unterschiedlichen Entwürfen im konkurrierenden Ablauf kompensiert, bzw. ausgenutzt, um Verbesserungen für verschiedene Fälle zu erzielen. Der Anteil an Berechnungen mit schlechteren Struktureigenschaften ist damit als Konsequenz notwendig, um beispielsweise Massen-

minimierung, Kontaktkraftminimierung und Intrusionsminimierung anzustreben, die teils entgegengesetzte Ziele darstellen. Gesteigert wird der Vergleich noch durch die Abtastung der Wandstärke zwischen oberer und unterer Grenze für bessere Vergleichbarkeit. Durch die Variation der Wandstärke oder dem Skalieren eines Querschnitts, wird dem Verfahren gestattet so viel Masse für einen Entwurf zu investieren, die nötig ist, um beispielsweise eine vorgegebene Restriktionsgrenze einzuhalten, sei der Entwurf noch so ungeeignet.

Außerdem hängt die Performance der verwendeten heuristischen Verfahren von Personen ab, die an der Entwicklung des Verfahrens beteiligt sind und wie diese in das Verfahren implementiert sind. Auch die Datenlage hängt davon ab, wie viele Zeitpunkte pro Simulation herausgeschrieben werden und als Basis für heuristische Auswertungen verwendet werden. Weiterhin kann die Ergebnisfindung bei einer unterschiedlichen Anzahl von Funktionsaufrufen zu Unterschieden im Ergebnis führen. Die Abweichung hängt von den Metamodellen und dem Komplexitätsgrad ab, mit dem ein Entwurf bewertet wird, um mit den Struktureigenschaften der Entwürfe so nah wie möglich an die Restriktionsgrenze der Verschiebung zu gelangen. Die Heuristiken tasten den Entwurfsraum nur diskontinuierlich ab und dabei ist wahrscheinlich, dass nicht alle denkbar möglichen Entwürfe abgedeckt werden. Das Verfahren ist mit einer Reihe von Heuristiken ausgestattet, mit dem Ziel, nur mechanisch begründete Entwürfe zu generieren und möglichst effizient zu einem besten Entwurf zu gelangen.

10.5 Ausblick

In der Graphensyntax sind Orientierungsvektoren zur Ausrichtung von Profilen um die eigene Achse integriert. Bisherige Graphenmanipulationen nehmen jedoch keinen Einfluss auf diese Vektoren, weshalb auch nur symmetrische Profilquerschnitte in den Anwendungsbeispielen definiert sind. In Zukunft sollte der Orientierungsvektor durch neue Heuristiken oder durch eine Parametrisierung in der inneren Optimierungsschleife mechanisch begründet ausgerichtet werden. In diesem Zusammenhang könnten auch belastungsgerechte asymmetrische Profilquerschnitte mit einem vorgegebenen Füllgrad vergeben werden.

Ein weiteres Beispiel zur ungenutzten Geometriebeschreibung sind die implementierten NURBS. Die Erzeugung von Profilen entlang an Bahnkurven ist derzeit zwar möglich, findet in den Demonstrationsbeispielen aber keine Anwendung. Zum einen leiten Bögen unter Last zusätzliche Biegemomente ein, die ggf. einen höheren Materialbedarf nach sich zieht, doch ein Vorteil könnte der Einsatz von minimal ausgebildeten Bögen sein, um eine immer gleiche Deformationsrichtung auszulösen. Das könnte die Robustheit der Strukturen deutlich steigern. Weiterhin wäre eine Parametrisierung für die innere Optimierungsschleife möglich, um die Designfreiheit zu erweitern.

Zwar steigern die nachgiebigen Verbindungsknoten die Simulationsgüte im Vergleich zu starren Elementen, jedoch blieben Fragestellung bezüglich Herstellbarkeit unbeantwortet. Hierzu müssen weitere Untersuchungen dazu erfolgen, welche Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen könnten und wie die geometrischen Eigenschaften in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens in den Simulationsmodellen berücksichtigt werden. Die detaillierte Modellierung

ist ein wichtiger Aspekt für die Prognosegüte.

Für die praktische Anwendung des Verfahrens für Strukturen im Bereich der Meso-Ebene, die an der Energieabsorption beteiligt werden sollen, hängt die Validität stark von der Materialkarte ab. Für additive Fertigungsverfahren müssen entsprechende Materialkarten über mehrere Versuche und anschließender Wärmebehandlung adäquat validiert werden.

Zusätzlich sollte in Zukunft die Vermeidung von Stützstrukturen über eine geometrische Restriktion erfolgen. Dabei sollte der Überhang ggf. variabel restringiert werden können, welche für die Graphen-Ebene implementiert werden kann.

Für die weitere Betrachtung könnte eine Ausführung aus massiven Strukturelementen sinnvoll sein, denn bei der Fertigung könnte sonst das eingesetzte Pulver in den Hohlräumen der Struktur eingeschlossen werden und im Anschluss ggf. nicht entfernt werden. Bis hierhin sollte die Struktur lediglich am Deformationsprozess beteiligt werden. Für weitere Funktionsintegration, wie tragender oder stützender Funktion, liegt die Vermutung zugrunde, dass die gedruckten Komponenten Schwierigkeiten mit der Lebensdauer besitzen und einem geforderten Lastspielwechsel nicht standhalten. Falls die simulative Berücksichtigung von Fatigue-Analysen möglich ist, dann muss diese in den Lastfallkatalog aufgenommen und über eine Restriktion ggf. in den Optimierungsablauf berücksichtigt werden.

Eines der Ziele dieser Arbeit ist der Einsatz zur Layout Findung im Bereich von Kraftfahrzeugen im Insassenschutz und passiver Sicherheit. Dazu könnten beispielsweise Teile im Bereich des Unterbodens oder im Bereich des Vorderwagens zur Optimierung freigegeben werden. Im letzten Beispiel in Kapitel 9.4 wird eine mögliche Layout Findung im Bereich des Vorderwagens unter dem Einsatz des entwickelten Verfahrens mit 5 Lastfällen demonstriert. Auch in diesem Beispiel wird ersichtlich, dass die benötigten Methoden auf den Anwendungsfall abgestimmt sein müssen. Für den Einsatz für Fahrzeuglayouts werden in Zukunft zusätzliche Schubfelder für nötige Struktursteifigkeit benötigt, um dadurch mit anderen Bauweisen in Konkurrenz treten zu können. Bisherige Layouts verwendeten Lastpfade durch Komponenten, die über beispielsweise Schalenbauweise oder derzeit auch längsträgerartige Gebilde aus Aluminiumguss darstellen. Der Aufbau zeigt meistens direkte Verbindungen zwischen dem Stoßfänger und dem Unterboden, die relativ gerade verlaufen. Das Aluminiumgussverfahren zur Erzeugung von großen Strukturgussknoten bietet die Möglichkeit, benötigte Teile und Schweißpunkte stark zu reduzieren. Dieser Aufbau resultiert aus den Anforderungen verschiedener Lastfälle und der pragmatischen Verbindung der Komponenten und Aufnahme verschiedener Aggregate, Dämpfer- und Federanbindungen. Dieser ändert sich auch bei Änderung des Antriebsstrangs wohl erst mal nicht. Außerdem müssen die zusätzlichen Anbauteile physikalisch in die Simulation integriert werden, um einen möglichen Blockzustand bei Crash zu simulieren. Die Erweiterung der Geometriepäsentation ist durchaus ein wichtiger Bestandteil des Verfahrens und muss grundlegend recht detailliert nach Anwendungsfall und Anforderungen erfolgen. Zusammenfassend weist die Methode durch zusätzliche Erweiterungen das Potential auf, sinnvoll in der Fahrzeugentwicklung eingesetzt zu werden, um neue Karosseriekonzepte zu untersuchen und neue Layout Freiheiten durch z.B. kleinere Aggregate sinnvoll auszunutzen.

11 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einer Erweiterung des Verfahrens der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Generierung und automatisierten Optimierung von Strukturvorschlägen basierend auf einem dreidimensionalen Graphen. Eine Besonderheit ist die Zuordnung von zweidimensionalen Graphen zur Beschreibung von Querschnitten, welche die Erzeugung von Strukturen mittels zusammengesetzten Profilen ermöglicht. Für die Verbindungsknoten werden generische dreidimensionale Strukturknoten verwendet, die sich aus der geometrischen Situation heraus ergeben. Damit sind Verbindungsknoten vom Grad 4 möglich. Durch die Entwicklung können neue Felder im Rahmen der Methode zur Behandlung von Modellen mit hochgradig nicht-linearem Verhalten und dynamischen Belastungen eröffnet werden. Die von der Zielfunktion losgelöste Verwendung von streng definierter Geometriebeschreibung kombiniert mit flexiblen Strategien durch Selektion und detaillierter Optimierung einzelner Entwürfe, ermöglicht den Einsatz mit Anforderungen, wie sie in der Auslegung von crashbelasteter Strukturen auftreten. Das übergeordnete Ziel der Insassensicherheit wird in der Fahrzeugentwicklung über Sensorik und passive Sicherheitsmaßnahmen, wie Airbags und Rückhaltesysteme, realisiert. Aber auch die strukturelle Gestalt von Karosseriestrukturen trägt einen wesentlichen Teil dazu bei. Idealerweise wird bereits ein Großteil der kinetischen Energie über die Deformation dissipiert. In der Simulationstechnik müssen somit Kontaktkräfte und infolge dessen Beschleunigungen, Intrusionswerte, Massen und Energieabsorption betrachtet werden. Außerdem werden simuliertes Materialversagen und Plastizität berücksichtigt.

Zur Umsetzung wird die dazu benötigte Graphen-Syntax beschrieben, aus der automatisiert ein rechenfähiges Finite-Elemente Simulationsmodell erzeugt werden kann. Außerdem beinhaltet das Verfahren Methoden, die eine automatisierte Manipulation des Graphen ermöglicht. Für mehr Flexibilität sind NURBS zur Beschreibung von Profilstrukturen entlang von Bahnkurven mit bis zu einem Grad von drei implementiert. Die Geometriebeschreibung für Bahnkurven lässt sich ebenfalls innerhalb des Querschnitts der einzelnen Profile einsetzen. Die Erzeugung von durchdringungsfreier Geometrie wird über eine zusätzliche Geometrieebene realisiert. Dazu wird stets die gesamte Geometrie mittels Triangulation diskretisiert. Die Vorgehensweise ermöglicht eine Überprüfung von Durchdringungen, indem eine dreiecksbasierte Verschneidung über einen Linienzug geprüft wird. Die Prüfung kann für Eigendurchdringung und Fremdkörperdurchdringung eingesetzt werden. Zusätzlich wird die Triangulation zur Ermittlung von Massen, Erzeugung der Bahnkurven, Erzeugung der generischen Verbindungsknoten und zur eigentlichen Geometriebeschreibung für die letztliche

Vernetzung der Finite-Elemente Modelle verwendet. Die topologische Manipulation wird mittels einer Reihe von Heuristiken ausgeführt. Dabei handelt es sich um regelbasierte Algorithmen, die eine Verbesserung der Struktureigenschaften erzielen sollen. Die verwendeten Strategien basieren auf den Heuristiken, die zur Optimierung der Querschnittsbeschreibung von Strangpressprofilen und lateralen Belastungen eingesetzt werden. Für die Verwendung in der spezifischen Geometrierepräsentation wurden die Heuristiken neu konzipiert. Basierend auf Finite-Elemente Simulationsdaten, werden über Geschwindigkeiten, Verschiebungen und spezifische innere Energiedichten verschiedene Phänomene detektiert bzw. identifiziert. Zu den Annahmen gehören Leitsätze, wie das Unterstützen von schneller deformierenden Bereichen oder das Erkennen und Nutzen von Deformationsräumen für mögliche Zug- oder Druckbelastungen. Eine Manipulation der Struktur an markanten Stellen im Deformationsprozess lässt einen unverhältnismäßig hohen Einfluss auf das prinzipielle Strukturverhalten zu.

Jede Manipulation wird auf geometrische Einschränkungen bezüglich Durchdringungen, minimaler und maximaler Profillängen oder anliegende Verbindungswinkel geprüft, außerdem können obere und untere Wandstärkengrenzen vorgegeben werden. Die geometrischen Restriktionen können dazu genutzt werden, um Einfluss auf die Entwürfe auszuüben, damit fertigbare Strukturen auftreten. Für symmetrische Lastfälle können Symmetriebedingungen verwendet werden. Die Symmetrie kann über die Ebenen im Koordinatenursprung definiert werden und eröffnet bis zu sieben Kombinationen mit einschließlich Dreifachsymmetrie. In den aufgeführten Beispielen sind die Symmetriebedingungen ein wichtiges Instrument zur Komplexitätsreduktion im Optimierungsprozess. Die im Anschluss ausgeführte innere Optimierungsschleife eines jeden Entwurfs stellt einen wichtigen Mechanismus der Methode dar und wird zur Regulierung der Entwürfe entlang von Restriktionsgrenzen eingesetzt. Die detaillierte Optimierung eröffnet für jeden Entwurf eine individuelles, abgeschlossenes Optimierungsverfahren. Für die innere Optimierungsschleife sind Form- und Dimensionierungsstrategien umgesetzt und eine Erweiterung zur Skalierung von Querschnitten in eindimensionaler Betrachtung implementiert. Besonders, wenn der Einfluss von Wandstärken bei Strukturen auf dem Meso-Level an Einfluss verlieren, kann dies über die Skalierung der Querschnitte erfolgen. Grundsätzlich werden in der inneren Optimierungsschleife Dimensionierungsoptimierungen für Wandstärken eingesetzt, denn die meist umfangreiche Formoptimierung führt mit einer schnell ansteigenden Anzahl von Formvariablen zu einem erhöhten Ressourcenaufwand mit ggf. unbestimmtem Ausgang.

Die Leistungsfähigkeit wird anhand einer Reihe von Anwendungsbeispiele demonstriert. In den ersten Beispielen wird die mechanische Plausibilität mit einfachen Modellen bewertet und überprüft. Dazu zählen Fragestellungen zur Reduktion der Intrusion für einen unter Biegung belasteten Rahmen mit Festeinspannungen. Die Optimierungsstrategie wird mit einer Formoptimierung gestartet, denn die äußere Gestalt hat in diesem Fall einen sehr hohen Einfluss auf das Strukturverhalten. Im Anschluss wird die topologische Manipulation fortge-

setzt bei gleichzeitiger Massenrestriktion. In der zweiten Versuchsreihe trifft ein starrer Pfahl mittig auf eine würfelartige Rahmenstruktur, mit dem Ziel der Kontaktkraftminimierung. Das Verfahren ist in der Lage, für verschiedene Massen des Impaktors individuelle Lösungen zu generieren, die aus Sicht der Energieabsorption sehr nah am theoretisch optimalen Verhalten liegen. Dazu wird aufgezeigt, dass der Umgang mit Beschleunigungen erfolgsversprechend möglich ist. Daraufhin folgen unterschiedliche anwendungsbezogene Beispiele mit Bezug zu Crashlastfällen, wie sie in der Automobilindustrie eingesetzt werden können. Der Einsatz als Inlay-Struktur könnte grundsätzlich in Bereichen wie dem Schweller oder wie gezeigt, in Crashelementen hinter dem Stoßfänger eingesetzt werden. Die generierten Strukturen können an der Energieabsorption beteiligt werden. Im letzten Beispiel wird das Verfahren zur Layout Findung im Bereich des Vorderwagens hinter dem Stoßfänger eingesetzt. Das Modell stellt eine abstrahierte Form dar und zeigt die derzeitigen Möglichkeiten des Verfahrens. Diese Aufgabenstellung beinhaltet die Berücksichtigung von 5 Lastfällen, bestehend aus 3 dynamischen Crashlastfällen inklusive plastischem Materialverhalten, Dehnratenabhängigkeiten und Versagen. Zusätzlich sind zwei statische Lastfälle mit linear elastischem Materialverhalten integriert. Das Verfahren wird mit dem Ziel der Kontaktkraftminimierung aus den drei Crashlastfällen ausgeführt. Dabei konnten insgesamt 13 Restriktionen berücksichtigt und erfüllt werden.

Ein wichtiger Mechanismus im Bereich plastischer Deformation zur Energieabsorption stellt das Falten und Beulen von dünnwandigen Strukturen dar. Die in dieser Arbeit verwendeten spezifische Geometrierepräsentation von Rahmenstrukturen in hohler Ausführung sind grundsätzlich in der Lage beispielsweise axiales Crushing hervorzurufen. Damit dieses Verhalten gezielt verwendet werden kann, werden dominante lokale Verprägungen als Auslöser benötigt. Grundsätzlich sind Teile der Struktur eher viel länger als breit und hoch und führen dadurch zu globalem Ausknicken mit weniger Energieabsorptionseffizienz. Als Folge stellt sich ein hoher Anteil von Biegemechanismen ein, welcher deutlich mehr Masse für Teilstrukturen benötigt, um ein ähnliches Energieaufnahme-Niveau im Vergleich zu Falten und Beulen zu erreichen. Der Vorteil aus diesem Mechanismus geht in gleichmäßigeren Verzögerungen hervor. Im Verlauf der Optimierung sinkt die Knickneigung einzelner Profile durch die stetige Erzeugung neuer Strukturelemente und der damit einhergehenden Verkürzung.

Das Verfahren ist in einer geschlossenen Java-Anwendung mit der Möglichkeit zur parallelisierten Berechnung auf HPC-Clustern umgesetzt. Das Verfahren kann in der inneren Optimierungsschleife Optimierungsalgorithmen von LS-OPT einsetzen und zur Neuvernetzung wird der Präprozessor HyperMesh von Altair verwendet. Als Finite-Elemente Solver können LS-DYNA, Pamcrash oder Radioss verwendet werden. Im Verfahren kann eine Strategie bestehend aus Form-, Dimensionierungs- und Topologieoptimierungsverfahren verwendet werden.

Literaturverzeichnis

- Aage, N., Nobel-Jørgensen, M., Andreasen, C. S., & Sigmund, O. (2013). Interactive topology optimization on hand-held devices. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, *47*(1), 1–6.
- Achtziger, W. (1999). Local stability of trusses in the context of topology optimization Part I: Exact modelling. *Structural optimization*, *17*, 235–246.
- Afrousheh, M., Marzbanrad, J., & Göhlich, D. (2019). Topology optimization of energy absorbers under crashworthiness using modified hybrid cellular automata (MHCA) algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, *60*, 1615–1488. <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02254-2>
- An, W., Han, X., Tovar, A., & Wang, S. (2021). Targeting the acceleration-time response of vehicle structures under crash impact using equivalent dynamic loads. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, *64*, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00158-021-02845-y>
- AUDI AG. (2019). *Audi R8 Karosserie*. <https://www.audi-mediacycenter.com/de/der-neue-audi-r8-dynamik-update-fuer-den-hochleistungsportwagen-11734/der-audi-space-frame-asf-11741>.
- Aulig, N., Nutwell, E., Menzel, S., & Detwiler, D. (2018). Preference-Based Topology Optimization for Vehicle Concept Design with Concurrent Static and Crash Load Cases. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, *57*(1), 251–266. <https://doi.org/10.1007/s00158-017-1751-z>
- Bahramian, N., & Khalkhali, A. (2020). Crashworthiness topology optimization of thin-walled square tubes, using modified bidirectional evolutionary structural optimization approach. *Thin-Walled Structures*, *147*.
- Baumgartner, A., Harzheim, L., & Mattheck, C. (1992). SKO (soft kill option): the biological way to find an optimum structure topology. *International Journal of Fatigue*, *14*(6), 387–393.
- Bendsøe, M. P. (1989). Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural optimization*, *1*(4), 193–202. <https://doi.org/10.1007/BF01650949>

- Bendsøe, M. P., Ben-Tal, A., & Zowe, J. (1994). Optimization methods for truss geometry and topology design. *Structural optimization*, 7, 141–159.
- Bendsøe, M. P., & Kikuchi, N. (1988). Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 71(2), 197–224. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(88\)90086-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(88)90086-2)
- Beyer, F., Schneider, D., & Schumacher, A. (2019). Development of heuristics dealing with material failure of composite profile structures for the Graph and Heuristic based Topology Optimization. *Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization, Proceedings of the 13th World Congress of Structural and Topology Optimization (WCSMO 13)*.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00158-020-02768-0>
- Beyer, F., Schumacher, A., & Pohl, T. (2022). *Neue Möglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung von 3D-Crash-Strukturen durch detaillierte Modellierung der Verbindungsknoten, erschienen in den VDI-Berichten zum 20. VDI-Kongress SIMVEC – Aktuelle Herausforderungen bei der Auslegung und Absicherung von Fahrzeugsystemen, 22.-23.11.2022 in Baden Baden, ISBN 978-3-18-092407-6*.
- Bochenek, B., & Tajs-Zielińska, K. (2016). GOTICA - generation of optimal topologies by irregular cellular automata. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 55, 1–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00158-016-1614-z>
- Box, G., & Wilson, K. (1951). WKB “On the experimental attainment of optimum condition”. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (13)*, 1, 20.
- Buhmann, M. D. (2003). *Radial basis functions: theory and implementations* (Bd. 12). Cambridge university press.
- Büttner, J. (2022). *Effiziente Lösungsansätze zur Reduktion des numerischen Ressourcenbedarfs für den operativen Einsatz der Multidisziplinären Optimierung von Fahrzeugstrukturen* [Dissertation]. Bergische Universität Wuppertal, Deutschland.
- Chapelle, D., & Bathe, K.-J. (2011). *The Finite Element Analysis of Shells-Fundamentals* (2. Aufl.). Springer.
- Choi, W. S., & Park, G. J. (1999). Transformation of dynamic loads into equivalent static loads based on modal analysis. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 46(1), 29–43. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0207\(19990910\)46:1<29::AID-NME661>3.0.CO;2-D](https://doi.org/https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(19990910)46:1<29::AID-NME661>3.0.CO;2-D)

- Choi, W., & Park, G. (2002). Structural Optimization using Equivalent Static Loads at all the Time Intervals. *Comput. Methods. Appl. Math.*, 191(19), 2077–2094.
- 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.
- Fleury, C. (1989). CONLIN: An efficient dual optimizer based on convex approximation concepts. *Struct Optim*, 1(2), 81–89.
- Haines, E. (1994). Point in polygon strategies. Graphics gems IV, edited by Paul S. Heckbert.
- Hardy, R. L. (1971). Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces. *Journal of geophysical research*, 76(8), 1905–1915.
- Hardy, R. L. (1990). Theory and applications of the multiquadric-biharmonic method 20 years of discovery 1968–1988. *Computers & Mathematics with Applications*, 19(8-9), 163–208.
- Harzheim, L. (2019). *Strukturoptimierung: Grundlagen und Anwendungen* (3. Aufl.). Verlag Europa-Lehrmittel.
- Hemp, W. S. (1974). Michell Framework for Uniform Load Between Fixed Supports. *Engineering Optimization*, 1(1), 61–69. <https://doi.org/10.1080/03052157408960577>
- Huang, X., Xie, Y. M., & Lu, G. (2007). Topology optimization of energy-absorbing structures. *International Journal of Crashworthiness*, 12(6), 663–675. <https://doi.org/10.1080/13588260701497862>
- Huang, X., & Xie, Y. (2007). Convergent and mesh-independent solutions for the bi-directional evolutionary structural optimization method. *Finite Elements in Analysis and Design*, 1039–1049. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2007.06.006>
- Hunkeler, S. (2013). *Topology Optimization in Crashworthiness Design via Hybrid Cellular Automata for Thin-Walled Structures* [Diss., Queen Mary University of London, UK].
- Inoue, N., Shimotai, N., & Uesugi, T. (1994). Cellular automaton generating topological structures. In A. McDonach, P. T. Gardiner, R. S. McEwen & B. Culshaw (Hrsg.), *Second European Conference on Smart Structures and Materials* (S. 47–50, Bd. 2361). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.184866>
- Ivarsson, N., Wallin, M., & Tortorelli, D. (2018). Topology optimization of finite strain viscoplastic system under transient loads. *Int J Numer Methods Eng.*, 114, 1351–1367.

- Karev, A., Harzheim, L., Immel, R., & Erzgräber, M. (2019). Free sizing optimization of a front hood using the ESL method: overcoming challenges and traps. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 60. <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02285-9>
- Kim, D.-H., Jung, K.-H., Kim, D.-J., Park, S.-H., Kim, D.-H., Lim, J., Nam, B.-G., & Kim, H.-S. (2017). Improving pedestrian safety via the optimization of composite hood structures for automobiles based on the equivalent static load method. *Composite Structures*, 176, 780–789. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.016>
- Kirsch, U. (1990). On singular topologies in optimum structural design. *Structural optimization*, 2(3), 133–142.
- Kita, E., & Toyoda, T. (2000). Structural design using cellular automata. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 19, 64–73. <https://doi.org/10.1007/s001580050086>
- Kramer, F. (2009). *Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen*. Vieweg+Teubner.
- Lewiński, T., Sokół, T., & Graczykowski, C. (2011). *Michell Structures* (1. Aufl.). Springer, Cham.
- Link, S., Schneider, D., Schumacher, A., & Ortmann, C. (2019). Integration of flange connections in the Graph and Heuristic Based Topology Optimization of Crashworthiness Structures. *Rodrigues, H. et.al.: EngOpt 2018 Proc. of the 6th International Conference on Engineering Optimization*, 619–631.
- Lu, S., Zhang, Z., Guo, H., Park, G.-J., & Zuo, W. (2021). Nonlinear dynamic topology optimization with explicit and smooth geometric outline via moving morphable components method. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 64(4), 2465–2487. <https://doi.org/10.1007/s00158-021-03000-3>
- Michell, A. (1904). The limits of economy of material in frame-structures. *Philos Mag, Series 6*, 8(47), 589–597. <https://doi.org/10.1080/14786440409463229>
- Möller, T. (1997). A Fast Triangle-Triangle Intersection Test. *Journal of Graphic Tools*, 2. <https://doi.org/10.1080/10867651.1997.10487472>
- Mozumder, C. (2010). *Topology Optimization in Crashworthiness Design via Hybrid Cellular Automata for Thin-Walled Structures* [Diss., Univ of Notre Dame, USA].
- Mozumder, C., Renaud, J., & Tovar, A. (2012). Topometry optimisation for crashworthiness design using hybrid cellular automata. *Int. J. of Vehicle Design*, 60, 100–120. <https://doi.org/10.1504/IJVD.2012.049160>
- Olschinka, C., & Schumacher, A. (2008). Graph based topology optimization of crashworthiness structures. *PAMM Proc. Applied Math. Mech.*, 8, 10029–10032.

- Ortmann, C. (2015). *Entwicklung eines graphen- und heuristikbasierten Verfahrens zur Topologieoptimierung von Profilquerschnitten für Crashlastfälle* [Diss., Bergische Universität Wuppertal, Deutschland].
- Ortmann, C., & Schumacher, A. (2013). Graph and heuristic based topology optimization of crash loaded structures. *Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization*, *47*, 839–854.
- Ortmann, C., & Schumacher, A. (2014). Mathematical Description and Algorithmization of Expert Knowledge for the Support of the Topology Optimization of Crashworthiness Structures. *PAMM Proc. Appl. Math. Mech.*, *14*, 1023–1026.
- 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*, *64*, 1063–1077.
- Park, G. J. (2010). Equivalent Static Loads Method for Non Linear Static Response Structural Optimization. *LS-DYNA Forum, Bamberg*.
- Park, G. (2011). Technical overview of the Equivalent Static Loads Method for Non-Linear Static Response Structural Optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, *43*(3), 319–337.
- Park, G., & Kang, B. (2003). Validation of a Structural Optimization Algorithm Transforming Dynamic Loads into Equivalent Static Loads. *Journal of Optimization Theory and Applications*, *118*, 191–200. <https://doi.org/10.1023/A:1024799727258>
- Patel, N. (2007). *Crashworthiness Design Using Topology Optimization* [Diss., University of Notre Dame, USA.].
- Patel, N., Renaud, J., & A., T. (2009). Crashworthiness Design Using Topology Optimization. *ASME. J. of Mech Design.*, *132*(6).
- Pedersen, C. (2003). Topology optimization design of crushed 2D-frames for desired energy absorption history. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, *25*, 368–382.
- Pedersen, C. (2004). Crashworthiness design of transient frame structures using topology optimization. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, *193*, 653–678.
- Piegl, L., & Tiller, W. (1995). *The NURBS book*. Springer Berlin, Heidelberg.
- Pischinger, S., & Seiffert, U. (2021). Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 9. Auflage, 1204 Seiten.

- Prager, W., & Rozvany, G. I. N. (1977). Optimal Layout of Grillages. *Journal of Structural Mechanics*, 5(1), 1–18. <https://doi.org/10.1080/03601217708907301>
- Querin, O., Steven, G., & Xie, Y. (1998). Evolutionary structural optimisation (ESO) using a bidirectional algorithm. *Engineering Computations*, 15, 1031–1048. <https://doi.org/10.1108/02644409810244129>
- Ramnath, N., S. and Aulig, Bujny, M., Menzel, S., Gandikota, I., & Horner, K. (2019). Load Case Preference Patterns based on Parameterized Pareto-Optimal Vehicle Design Concept Optimization. *European LS-DYNA Conference 2019, Koblenz, Germany*.
- Rozvany, G. I. (1996). Difficulties in truss topology optimization with stress, local buckling and system stability constraints. *Structural optimization*, 11, 213–217.
- Rozvany, G. I. (2009). A critical review of established methods of structural topology optimization. *Structural and multidisciplinary optimization*, 37(3), 217–237.
- Rozvany, G. I., Zhou, M., Rotthaus, M., & Gollub, F., W. and Spengemann. (1989). Continuum-type optimality criteria methods for large finite element systems with a displacement constraint. Part I. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 1, 47–72. <https://doi.org/10.1007/BF01743809>
- Schneider, D., Schumacher, A., Donhauser, T., Huf, A., & Schmeer, S. (2019). Flexible Graph Syntax for the Topology Optimization of Crashworthiness Profile Structures Made from Thermoplastic Composites. *Hausmann, J.M.: Selected, peer reviewed papers from the 22 nd Symposium on Composites, 2019, Kaiserslautern, Germany, 809, 493–499*.
- Schneider, D. (2023). *Graphen- und heuristikbasierte Topologieoptimierung von Profilstrukturen aus Faser-Kunststoff-Verbunden in Crashanwendungen* [Dissertation]. Bergische Universität Wuppertal, Deutschland.
- Schumacher, A., & Beyer, F. (2020). *Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen, FAT-Schriftenreihe 329, ISSN 2192-7863*.
- Schumacher, A., & Olschinka, C. (2008). Topology optimization based on graph theory of crash loaded flight passenger seats. *Proceeding of the 7th LS-DYNA Forum*.
- Schumacher, A., & Ortmann, C. (2013). Rule generation for optimal topology changes of crash-loaded structures. *Proceedings of the 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*.
- Schumacher, A. (2020). *Optimierung mechanischer Strukturen - Grundlagen und industrielle Anwendungen* (3. Aufl.). Springer.

- Sperber, J. (2022). *Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung axial belasteter Crashstrukturen* [Diss., Bergische Universität Wuppertal, Deutschland].
- Stander, N., & Craig, K. (2002). On the robustness of a simple domain reduction scheme for simulation-based optimization. *Engineering Computations*, 19(4), 431–450.
- Svanberg, K. (1987). The method of moving asymptotes—a new method for structural optimization. *Int J Numer Methods Eng*, 24(2), 359–373. <https://doi.org/10.1002/nme.1620240207>
- Svanberg, K. (2002). A Class of Globally Convergent Optimization Methods Based on Conservative Convex Separable Approximations. *SIAM J Optim*, 12, 555–573.
- Tovar, A. (2004). *Bone remodeling as a hybrid cellular automaton optimization process* [Diss., University of Notre Dame, USA.].
- Tovar, A., Patel, N. M., Niebur, G. L., Sen, M., & Renaud, J. E. (2006). Topology Optimization Using a Hybrid Cellular Automaton Method With Local Control Rules. *Journal of Mechanical Design*, 128(6), 1205–1216. <https://doi.org/10.1115/1.2336251>
- Triller, J., Immel, R., Harzheim, L., & Timmer, A. (2021). Difference-based Equivalent Static Load (DiESL) Method, an extension of the ESL method to improve the nonlinear approximation quality.
- Wang, H., & Xie, H. (2020). Multi-objective optimization of crashworthiness of vehicle front longitudinal beam. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 61, 1615–1488. <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02459-5>
- Weber, J., Kjolsrud, E., & Schober, K. (2016). *Kraftflussoptimierte Verbindungen im Ingenieurbau*.
- Weider, K., & Schumacher, A. (2018). A Topology Optimization Scheme for Crash Loaded Structures Using Topological Derivatives. *Schumacher, A., Vietor, T., Fiebig, S., Bletzinger, K.-U., Maute, K.: Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization*, 1601–1614.
- Weider, K., & Schumacher, A. (2019). Adjoint Method for Topological Derivatives for Optimization Tasks With Material and Geometrical nonlinearities. *Rodrigues, H. et.al.: EngOpt 2018 Proc. of the 6th International Conference on Engineering Optimization*, 867–878.
- Weider, K. (2021). *Topologische Ableitung zur Optimierung crashbelasteter Strukturen* [Dissertation]. Bergische Universität Wuppertal, Deutschland.
- Wriggers, P. (2013). *Nichtlineare finite-element-methoden*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56865-7>

- Xie, Y., & Seffen, K. (2000). Evolutionary Structural Optimization; Y.M. Xie and G.P. Steven; Accompanying Demonstration Software: O.M. Querin. Springer, London, 1997, 188 pages, ISBN 3-540-76153-5. *Engineering Structures - ENG STRUCT*, 22, 1224–1225. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(99\)00060-7](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(99)00060-7)
- Xie, Y., & Steven, G. (1992). A simple evolutionary procedure for structural optimization. *Computers and Structures*, 49(5), 885–896. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0045-7949\(93\)90035-C](https://doi.org/10.1016/0045-7949(93)90035-C)
- Xie, Y., Zuo, Z., Huang, X., Tang, J., Zhao, B., & Felicetti, P. (2011). Architecture and urban design through evolutionary structural optimisation algorithms. *Proceedings of the International Symposium on Algorithmic Design for Architecture and Urban Design*, 22.
- Yi, S.-I., Lee, J. Y., & Park, G.-J. (2012). Crashworthiness design optimization using equivalent static loads. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 226(1), 23–38. <https://doi.org/10.1177/0954407011411638>
- Yu, T. X., Xiang, Y. F., Wang, M., & Yang, L. M. (2015). Key performance indicators of tubes used as energy absorbers. *Key Engineering Materials*, 626, 155–161.
- Zeng, D., & Duddeck, F. (2017). Improved hybrid cellular automata for crashworthiness optimization of thin-walled structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 56, 101–115.
- Zhou, C., Ming, S., Xia, C., Wang, B., Bi, X., Hao, P., & Ren, M. (2018). The energy absorption of rectangular and slotted windowed tubes under axial crushing. *International Journal of Mechanical Sciences*, 141, 89–100.
- Zhou, M. (1996). Difficulties in truss topology optimization with stress and local buckling constraints. *Structural optimization*, 11(2), 134–136.
- Zhou, M., & Rozvany, G. (1991). The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 89(1-3), 309–336. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(91\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0045-7825(91)90046-9)

Anhang

Anhang-A – Materialkarte Aluminium

Tabelle 1: Materialkarte MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (mm, t, s, N)

Mid	roh	E	PR	sigy	fail		
1	$2.7e^{-9}$	70000	0.33	311.0	0.2		
eps1	eps2	eps3	eps4	eps5	eps6	eps7	eps8
0.0	0.0034373	0.0085932	0.016327	0.027928	0.045329	0.071431	0.11058
es1	es2	es3	es4	es5	es6	es7	es8
311.00	316.64	324.52	335.2	348.96	365.52	383.70	401.65

nach Ortmann, 2015

Anhang-B – Optimierungshistorie: Variation der Masse des Pfahls, Beispiel 2

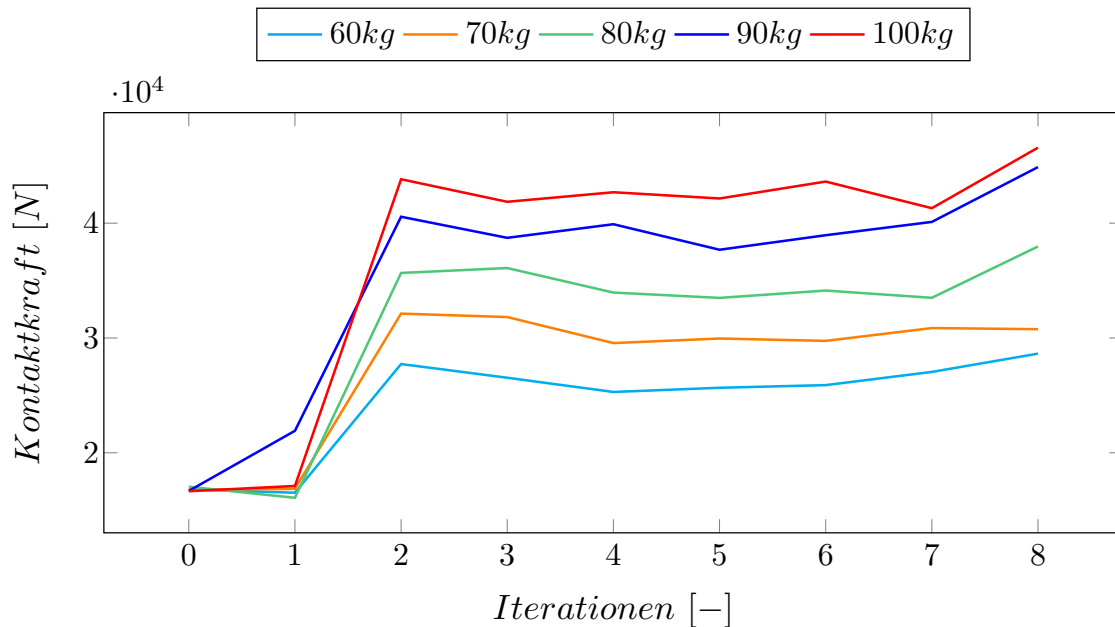


Abbildung A.1: Maximale Kraftwerte der Entwürfe über die Iterationen in der Reihe – Starrer Pfahl trifft Rahmenstruktur mittig bei Variation der Masse des Pfahls – Minimiere die Kontaktkraft der Struktur

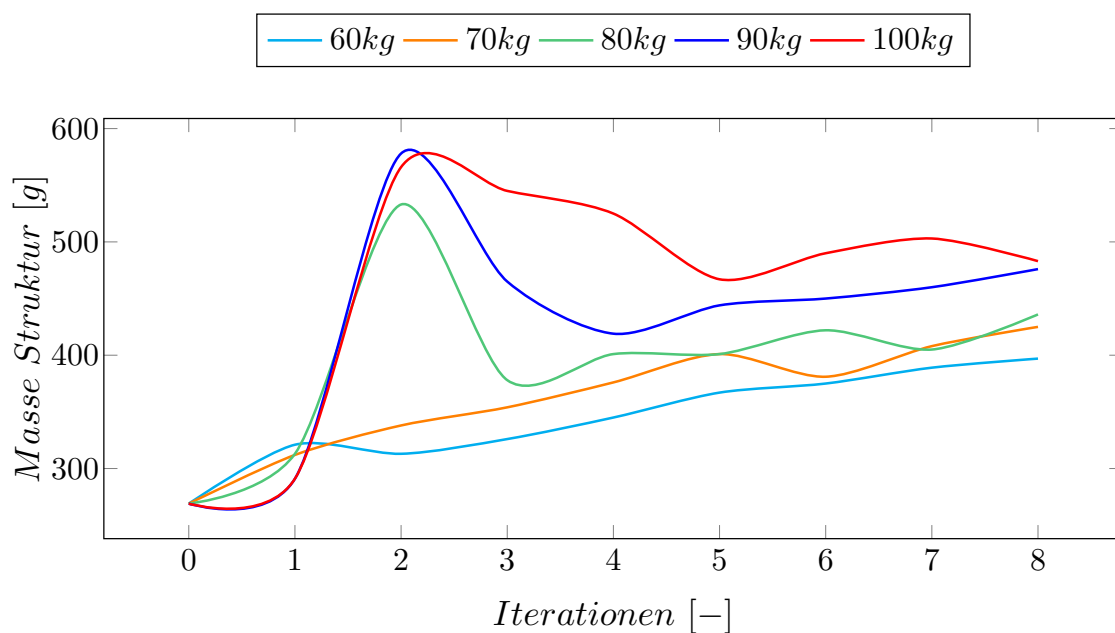


Abbildung A.2: Masse der Entwürfe über die Iterationen in der Reihe – Starrer Pfahl trifft Rahmenstruktur mittig bei Variation der Masse des Pfahls – Minimiere die Masse der Struktur

Anhang-C – Deformationsbilder: Variation der Masse des Pfahls, Beispiel 2

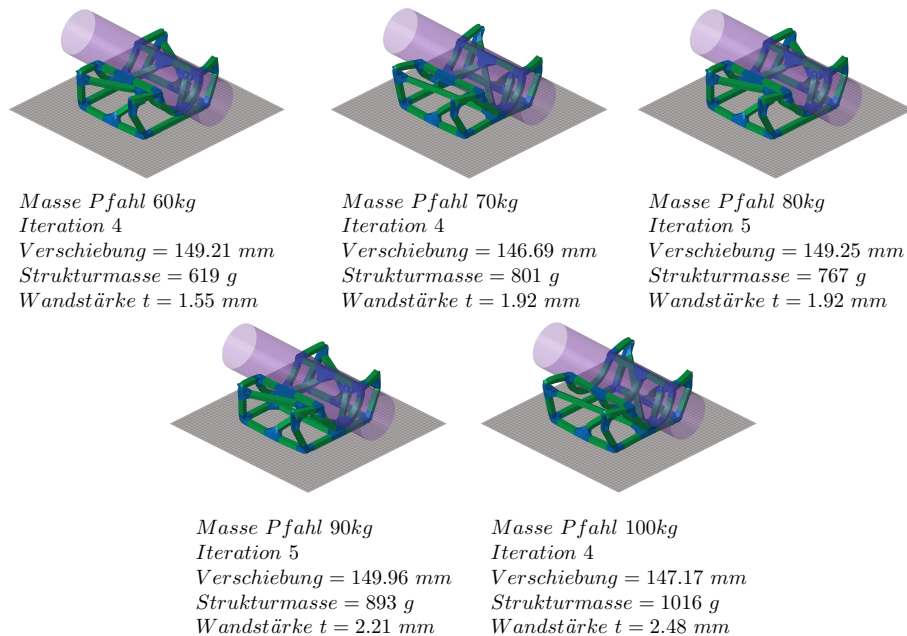


Abbildung A.3: Auswahl von Entwürfen Starrer Pfahl trifft Rahmenstruktur mittig bei Variation der Masse des Pfahls, deformiert: 60kg, 70kg, 80kg, 90kg, 100kg – Minimiere die Kontaktkraft der Struktur

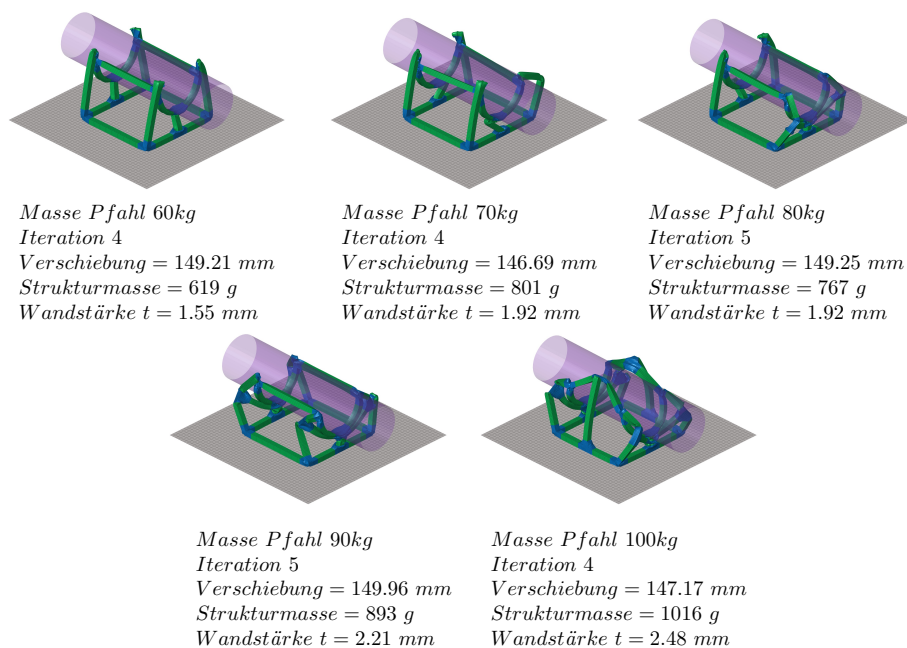


Abbildung A.4: Auswahl von Entwürfen Starrer Pfahl trifft Rahmenstruktur mittig bei Variation der Masse des Pfahls, deformiert: 60kg, 70kg, 80kg, 90kg, 100kg – Minimiere die Masse der Struktur

Anhang-D – Auflösungsänderung: komplexe Durchdringungsprüfung

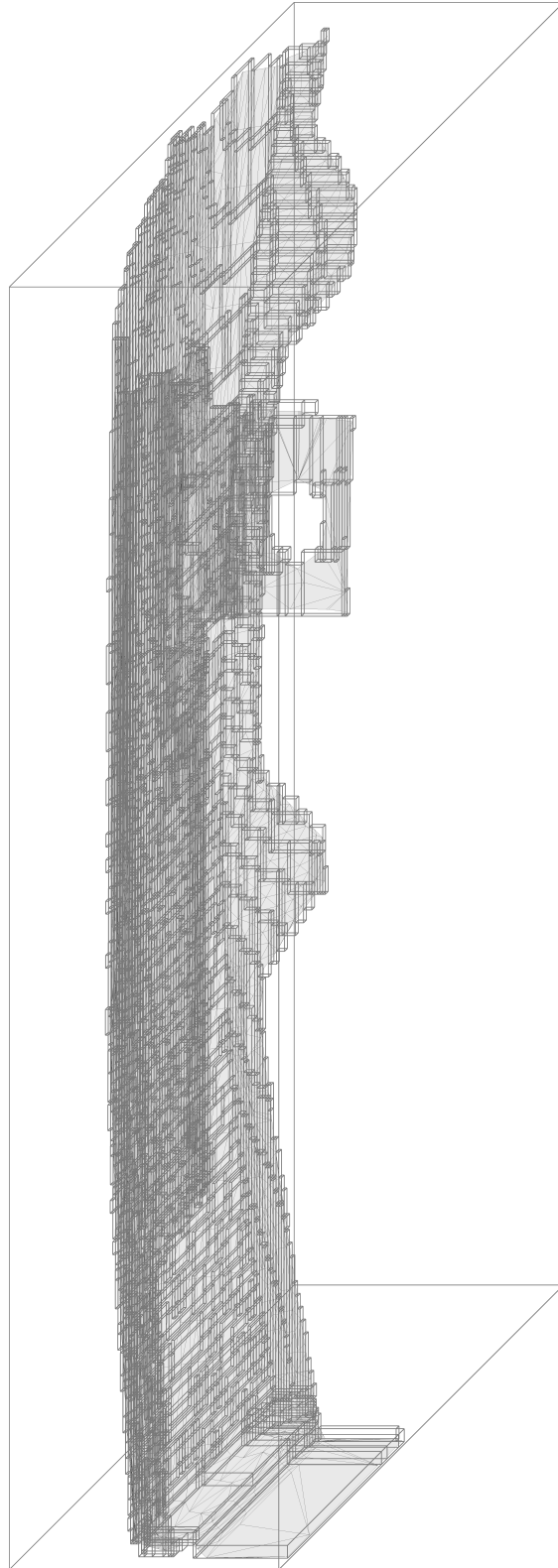


Abbildung A.5: Darstellung Komplexe Bauraumrestriktion anhand eines Blechs – Feinere Ausführung der Quaderaufteilung

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

1. Dr.-Ing. Christopher Ortmann (2015): Entwicklung eines graphen- und heuristikbasierten Verfahrens zur Topologieoptimierung von Profilquerschnitten für Crashlastfälle, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-3746-3
2. Dr.-Ing. Robert Dienemann (2018): Entwicklung einer Optimierungsmethodik für die Form- und Topologieoptimierung von tiefziehbaren Blechstrukturen, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-6196-3
3. Dr.-Ing. Constantin Diez (2018): Process for Extraction of Knowledge from Crash Simulations by means of Dimensionality Reduction and Rule Mining [https://d-nb.info/1182555063/34]
4. Dr.-Ing. Manuel Ramsair (2021): Integration der Topologie- und Formoptimierung in den automatisierten digitalen Entwurf von Fachwerkstrukturen, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-7788-9
5. Dr.-Ing. Niklas Klinke (2021): Strategien zur Optimierung von flexibel gewalzten Bauteilen in Karosseriestrukturen, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-7936-4
6. Dr.-Ing. Saad Eddine Hafsa (2021): Topology optimization method for the adaptation of mechanical structures, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-8306-4
7. Dr.-Ing. Katrin Weider (2021): Topologische Ableitung zur Optimierung crashbelasteter Strukturen, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-8248-7
8. Dr.-Ing. Jana Büttner (2022): Effiziente Lösungsansätze zur Reduktion des numerischen Ressourcenbedarfs für den operativen Einsatz der Multidisziplinären Optimierung von Fahrzeugstrukturen, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-8560-0
9. Dr.-Ing. Johannes Sperber (2022): Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung axial belasteter Crashstrukturen, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-8634-8
10. Dr.-Ing. Stefan Mertler (2022): Comparative Analysis of Crash Simulation Results using Generative Nonlinear Dimensionality Reduction, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-8761-1
11. Dr.-Ing. Sven Wielens (2022): Automatische Erstellung von Submodellen für die Crashtoptimierung von Fahrzeugkarosserien, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-8717-8
12. Dr.-Ing. Dominik Schneider (2023): Graphen- und heuristikbasierte Topologieoptimierung von Profilstrukturen aus Faser-Kunststoff-Verbunden in Craschanwendungen. Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-8884-7
13. Dr.-Ing. David Kracker (2024): Automatisierte Auswertung von Crashtsimulationen unterschiedlicher Fahrzeug-Entwicklungsständen mit Methoden des maschinellen Lernens. Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-9424-4