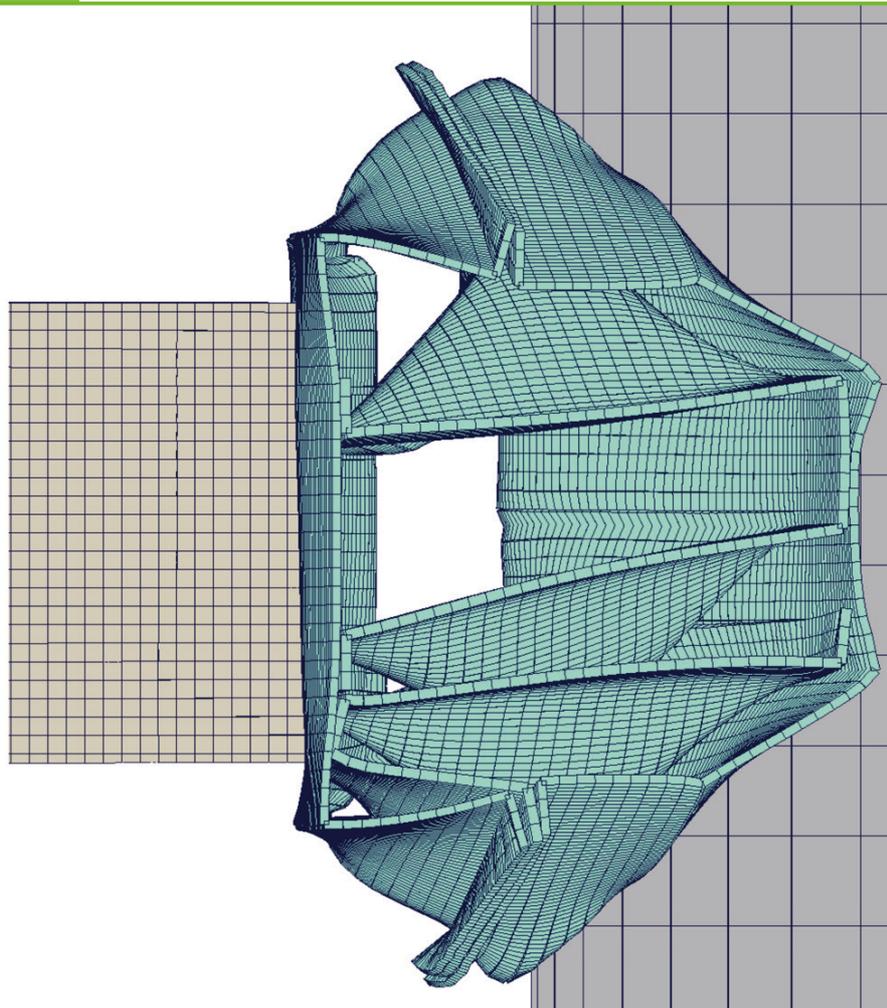
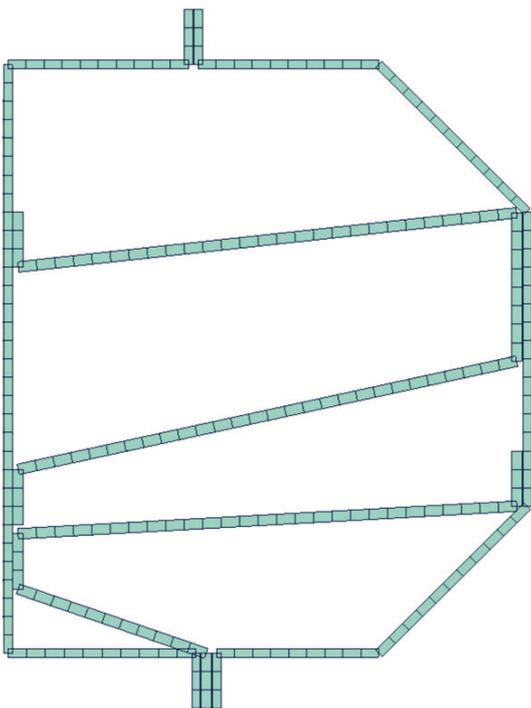


Graphen- und heuristikbasierte Topologieoptimierung von crashbelasteten Profilstrukturen aus verbundenen Blechen

Bergische Universität Wuppertal
Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen

Simon Link



**Graphen- und heuristikbasierte
Topologieoptimierung von crashbelasteten
Profilstrukturen aus verbundenen Blechen**

**Dissertation
zur Erlangung eines Doktorgrades**

in der
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
der
Bergischen Universität Wuppertal



vorgelegt von
Simon Link
aus Wuppertal

Wuppertal 2024

Tag der mündlichen Prüfung: 28.11.2024

Berichte aus dem Maschinenbau

Simon Link

**Graphen- und heuristikbasierte
Topologieoptimierung von crashbelasteten
Profilstrukturen aus verbundenen Blechen**

Shaker Verlag
Düren 2025

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2024

Copyright Shaker Verlag 2025

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

Printed in Germany.

Print-ISBN 978-3-8440-9989-8
PDF-ISBN 978-3-8191-0067-3
ISSN 0945-0874
eISSN 2944-7011
<https://doi.org/10.2370/9783819100673>

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Simon Link

Graphen- und heuristikbasierte Topologieoptimierung von crashbelasteten Profilstrukturen aus verbundenen Blechen

Dissertation, Bergische Universität Wuppertal,

Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik,

Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen, März 2024

Kurzfassung

Die Strukturoptimierung leistet in der Fahrzeugentwicklung einen wertvollen Beitrag zur Konstruktion leichter, kostengünstiger und sicherer Fahrzeuge. Die klassischen Methoden zur Optimierung von linear-statisch belasteten Strukturen kommen aufgrund der Vielzahl von Nichtlinearitäten und Bifurkationen in der Crashsimulation an ihre Grenzen, sodass sie nicht oder nur stark eingeschränkt eingesetzt werden können. Besonders die an der Bergischen Universität Wuppertal entwickelte Graphen- und Heuristik basierte Topologieoptimierung (GHT) hat sich zur Optimierung von crashbelasteten Profilstrukturen bewährt. Sie nutzt Heuristiken um die Topologie eines Profils zu ändern und somit Wände im Profilquerschnitt neu zu integrieren oder zu entfernen. Die implementierten Fertigungsrestriktionen stellen in Kombination mit der Graphenrepräsentation des Querschnitts sicher, dass die optimierten Strukturen unmittelbar ohne Geometrieableitung herstellbar sind. Bei den ersten Anwendungsfeldern der GHT liegt der Fokus hauptsächlich auf Profilstrukturen, die im Strangpressverfahren hergestellt sind und somit meistens aus Aluminium bestehen.

Mit dieser Arbeit wird die Möglichkeit zur Berücksichtigung eines neuen Fertigungskonzepts entwickelt, bei dem die Profilstruktur aus mehreren miteinander verbundenen Blechprofilen besteht, die an Flanschen miteinander gefügt werden. Dies ermöglicht die Verwendung verschiedener metallischer Werkstoffe, wie Aluminium- und Stahlegierungen, mit höheren Festigkeiten.

Die Komplexität der einzelnen Blechprofile kann variieren, es sollen jedoch nur Profilquerschnitte verwendet werden, die auch gefertigt werden können. Um dem gerecht zu werden, wurden Fertigungsrestriktionen speziell für die Blechbauweise entwickelt. Zum einen sind das Fertigungsrestriktionen, die das Umformen der Bleche für einen Schwenkbiegeprozess berücksichtigen. Zum anderen muss im Rahmen von Fertigungsrestriktionen das Fügen der Bleche überprüft werden und die Zugänglichkeit der Fügwerkzeuge ist sicherzustellen. Bei den Fügeverfahren wird der Fokus auf das Laserstrahlschweißen und das Widerstandspunktschweißen gelegt. Für alle simulierten Profile wird sichergestellt, dass es eine zulässige Fügereihenfolge gibt, mit der das Profil im Zusammenbau gefügt werden kann.

Stichworte: Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung, Crash, Blechprofil, Fertigungsrestriktion, Heuristik

Simon Link

Graph and heuristic based topology optimization of crash-loaded profile structures made of joined sheet metals

PhD thesis, University of Wuppertal, School of Mechanical Engineering and Safety Engineering, Chair for Optimization of Mechanical Structures, March 2024

Abstract

Structural optimization makes a valuable contribution to vehicle development by designing lightweight, cost-effective, and safe vehicles. The classical methods for optimizing linear-statically loaded structures reach their limits due to the large number of different non-linearities and bifurcations in the crash simulation, so that they cannot be used or only to a very limited extent.

The Graph and Heuristic-based Topology Optimization (GHT) developed at the University of Wuppertal has proven its worth in the optimization of crash-loaded profile structures. The method uses heuristics to modify the topology of the profile, thereby integrating or removing walls in the profile cross-section. The implemented manufacturing constraints, in combination with the graph representation of the cross-section, ensure that the optimized structures can be manufactured immediately without the need for geometry interpretation. The first applications for the GHT mainly focus on profile structures manufactured by extrusion, typically made of aluminum.

This work develops the possibility of considering a new manufacturing concept for the GHT, where the profile structure consists of multiple sheet metal profiles, which are joined at flanges. This allows the use of metals, such as aluminum and steel alloys with higher strengths.

The complexity of the individual sheet profiles can vary in the optimization, but only cross-sections that can be manufactured will be used. To meet this requirement, manufacturing constraints specifically for sheet metal design were developed. These include manufacturing constraints that consider the forming of sheets with a sheet metal bending process. Additionally, manufacturing constraints must consider the joining of sheets and ensure the accessibility of the joining tools. In terms of joining the focus is set on laser beam welding and resistance spot welding. For all simulated profiles it is ensured that there is a feasible joining sequence that enables the profile to be assembled.

Keywords: Graph and Heuristic based Topology Optimization, crashworthiness, sheet metal profile, manufacturing constraint, heuristic

Danksagung

Diese Dissertation wäre ohne die Unterstützung vieler Menschen in dem jetzigen Rahmen nicht möglich gewesen. Ihnen allen gilt mein herzlicher Dank.

An erster Stelle möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Axel Schumacher danken. Durch seine Expertise, seine wertvollen Anregungen und sein Vertrauen in meine Arbeit hat er mir die Freiheit gegeben, mich in der Forschung eigenständig zu entfalten. Diese Möglichkeit, meine wissenschaftlichen Interessen zu verfolgen und neue Ideen zu entwickeln, war für mich von großem Wert.

Ebenso danke ich meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl, die mich während meiner Promotionszeit begleitet haben. Besonders Dr.-Ing. Dominik Schneider, dessen fachlicher Austausch mir stets wertvolle Denkanstöße gegeben und meine Arbeit maßgeblich bereichert hat. Ein großes Dankeschön geht auch an Dr.-Ing. Sven Wielens und Christian Gutgar, mit denen ich mein Büro teilen durfte und die sehr zu einem angenehmen und produktiven Arbeitsumfeld beigetragen haben. Nicht zuletzt möchte ich Sandra Plücker und Annika Reiche danken, die sowohl organisatorisch als auch menschlich eine große Unterstützung waren.

Ein besonderer Dank gilt dem Kooperationspartner Volkswagen, insbesondere Dr.-Ing. Christopher Ortmann, Dr.-Ing. Johannes Sperber und Dr. Andreas Hillebrand, die diese Dissertation durch ihre fachliche Expertise und die Zusammenarbeit im Rahmen des gemeinsamen Forschungsprojekts unterstützt haben.

Darüber hinaus möchte ich mich bei den wissenschaftlichen Hilfskräften Winnie Teichmann, Jonas Steinhaus, Javed Butt, Florian Herrmann und Fabian Erbi bedanken, die mit ihrem Engagement einen wertvollen Beitrag zu meiner Forschung geleistet haben.

Ein herzlicher Dank geht außerdem an meine Kolleginnen und Kollegen aus der Doktorandenrunde, mit denen der regelmäßige Austausch stets neue Impulse für meine Arbeit gegeben hat.

Abschließend gilt mein Dank meiner Familie, auf die ich mich immer verlassen konnte. Sie hat mich während der gesamten Zeit unterstützt, wofür ich sehr dankbar bin.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Motivation	1
2 Stand der Forschung	3
2.1 Grundlagen der Strukturoptimierung	3
2.2 Topologieoptimierung mit linearen Finite Elemente Modellen	6
2.3 Topologieoptimierung unter Crashbelastung.....	7
2.4 Konstruktionsregeln für crashbelastete Schalenstrukturen	11
2.5 Technologie des Widerstandspunktschweißens und des Laserstrahlschweißens	15
3 Zielsetzung und Konzeption der Dissertation	18
4 Mathematische Graphen in der Topologieoptimierung	21
4.1 Geometriebeschreibung	21
4.2 <i>Customflange</i> -Syntax	22
4.3 Dijkstra-Algorithmus zur Bestimmung von Pfaden.....	25
5 Vom mathematischen Graphen zur Beschreibung von Profilen aus verbundenen Blechen	28
5.1 Prinzipieller Ablauf	28
5.2 Modifikation 1: Erzeugen der äußeren Flansche an <i>Customflanges</i> und Erzeugen der äußeren Schalen	31
5.3 Modifikation 2: Erzeugen von Pfaden von inneren <i>Edges</i> an den <i>Customflanges</i>	32
5.4 Modifikation 3: Erzeugen von Pfaden für alle verbleibenden inneren <i>Edges</i>	33
5.5 Modifikation 4: Verbinden von Pfaden.....	35
5.6 Modifikation 5: Erzeugen von Flanschen und Fügeverbindungen	36
6 Modellierung von Schweißverbindungen im Finite-Elemente-Modell....	38

7	Involvierung von Fertigungsrestriktionen	43
7.1	Allgemeine Fertigungsrestriktionen	43
7.2	Detektion der Überschneidung von <i>Edges</i>	44
7.3	Fertigungsrestriktion: Biegeumformen von Blechen mittels Schwenkbiegen	47
7.4	Fertigungsrestriktion: Fügen von Blechen durch Schweißen.....	50
7.5	Bestimmung der Fügbarkeit und der Fügereihenfolge	52
8	Heuristiken zur Topologieänderung, Formänderung und Dimensionierung.....	56
8.1	Universell einsetzbare Heuristiken.....	57
8.2	Heuristiken speziell für Profile aus verbundenen Blechen	62
8.2.1	Heuristik: <i>Start Trapezoid Structure (STST/STSC)</i>	63
8.2.2	Heuristik: <i>Continue Trapezoid Structure (CTST/CTSC)</i>	64
8.2.3	Heuristik: <i>Connect Inner Structure To Outer Flange (CIOT/CIOC)</i>	65
9	Optimierungsablauf der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung für Profilstrukturen aus verbundenen Blechen...	67
9.1	Realisierte Optimierungsschleifen	67
9.2	Dimensionierung von Profilen aus verbundenen Blechen.....	71
9.3	Optimierungsstrategie für vielversprechende Entwürfe (<i>Promising Designs</i>).....	72
10	Darstellung der Effizienz der Methode anhand praktischer Anwendungen	76
10.1	Anwendungsbeispiel: Schweller im seitlichen Pfahlaufprall.....	76
10.2	Minimierung der maximalen Kontaktkraft.....	78
10.2.1	Optimierung A: Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen für das Fügen und Biegeumformen	81
10.2.2	Optimierung B: Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen für das Fügen und Biegeumformen mit Dimensionierung der einzelnen Blehdicken.....	84

10.2.3 Optimierung C: Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen für das Fügen und ohne Biegeumformen	89
10.3 Optimierung D: Minimierung der Masse	94
10.4 Vergleich der Optimierungsergebnisse mit dem Fertigungskonzept Strangpressen.....	100
11 Zusammenfassung	104
12 Ausblick.....	106
Literaturverzeichnis	108
Anhang A	114

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

BED	Heuristik <i>Balance Energy Density</i> (Ausgleichen der Energiedichte)
CFC	Channel Frequency Class
CIOC	Heuristik <i>Connect Inner Structure To Outer Flange Compression</i> (Verbinden der inneren Struktur mit äußerem Flansch Druck)
CIOT	Heuristik <i>Connect Inner Structure To Outer Flange Tension</i> (Verbinden der inneren Struktur mit äußerem Flansch Zug)
CTSC	Heuristik <i>Continue Trapezoid Structure Compression</i> (Weiterführen einer trapezförmigen Struktur Druck)
CTST	Heuristik <i>Continue Trapezoid Structure Tension</i> (Weiterführen einer trapezförmigen Struktur Zug)
DNW	Heuristik <i>Delete Needless Walls</i> (Entfernen unbelasteter Wände)
ESLs	<i>Equivalent Static Loads</i> (Statische Ersatzlasten)
ESLSO	<i>Equivalent Static Loads method for non-linear static response Structural Optimization</i>
FE	Finite Elemente
GHT	Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung
HCA	<i>Hybrid Cellular Automaton</i>
HCATWS	<i>Hybrid Cellular Automaton for thin-walled structures</i>
ID	Identifikationsnummer
IOS	Innere Optimierungsschleife
Euro NCAP	<i>European New Car Assessment Programme</i>
SBW	Heuristik <i>Support Buckling Walls</i> (Abstützen beulender Wände)
SCW	Heuristik <i>Support Collapsing Walls</i> (Abstützen kollabierender Wände)
SRSM	Sequential Response Surface Method
STSC	Heuristik <i>Start Trapezoid Structure Compression</i> (Starten einer Trapezoidstruktur Druck)
STST	Heuristik <i>Start Trapezoid Structure Tension</i> (Starten einer Trapezoidstruktur Zug)
UDSC	Heuristik <i>Use Deformation Space Compression</i> (Ausnutzen des Deformationsraums Druck)

UDST	Heuristik <i>Use Deformation Space Tension</i> (Ausnutzen des Deformationsraums Zug)
VE	Vielversprechende Entwürfe

Lateinische Zeichen

A_w	Wirkfläche der Scherkraft
A_{wM}	Wirkfläche der Schweißlinse bei Kopfzugbelastung
A_{wQ}	Wirkfläche der Schweißlinse bei Scherzugbelastung
$\vec{a}, \vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{b}, \vec{c}$	Vektoren
b	Beulindex
d	Abstand zweier Geraden
d_{max}	Größte relative Verschiebung von FE-Knoten voneinander weg
d_{min}	Größte relative Verschiebung von FE-Knoten aufeinander zu
$\Delta d_{n,m}$	Abstand zwischen den FE-Knoten n und m
$\Delta d_{rel,n,m,t}$	Relative Verschiebung der Knoten n und m zum Zeitpunkt t
$d_{n,m,t}$	Abstand der Knoten n und m zum Zeitpunkt t
d_{n,m,t_0}	Abstand der Knoten n und m zum Zeitpunkt t_0
d_{sp}	Schweißpunktdurchmesser
F	Kraft
F_{wB}	Scherzugkraft bei Versagen der Schweißpunktverbindung
F_{wK}	Kopfzugkraft bei Versagen der Schweißpunktverbindung
g_i	Gerade
k	Gesamtanzahl von Flanschen einer Profilstruktur
L, L_i	Geraden
m	Masse
n	Index von FE-Knoten
n_{cd}	Index der Liste mit besten Entwürfe der letzten Iteration N_{cd}
n_h	Index der Liste mit Heuristiken N_h
n_i	Index für Iterationen
n_{tm}	Index der Liste mit Entwürfen für mögliche Topologieänderungen einer Heuristik N_{tm}
N_{cd}	Besten Entwürfe der letzten Iteration
N_h	Anzahl Heuristiken
N_n	Anzahl FE-Knoten einer Wand
N_t	Anzahl Zeitschritte einer Simulation
N_{tm}	Liste von Entwürfen mit möglichen Topologieänderungen einer Heuristik

P, P_i	Punkte
\vec{P}	Vektor vom Punkt P
R_m	Zugfestigkeit des Bauteilwerkstoffs
$\vec{r}, \vec{r}_1, \vec{r}_2$	Vektoren zu einem Punkt
s	Gewichtungsfaktor
t	Zeitindex / Zeitpunkt in einer Simulation
t_0	Startzeitpunkt einer Simulation
t_{end}	Endzeitpunkt einer Simulation
u_1, u_2	Parameter der Geradengleichungen
v_0	Anfangsgeschwindigkeit
$\Delta v_{n,m,t}$	Geschwindigkeitsdifferenz von FE-Knoten n und m zum Zeitpunkt t
w_{min}	kleinste Blechdicke der Schweißverbindung
x, y	Koordinaten

Griechische

Zeichen

α, β	Winkelbezeichner
γ	Winkel bei Customflange-Ausprägung
τ	Scherspannung
τ_{WB}	Scherfestigkeit des Bauteilwerkstoffs

Operatoren

$\sum_{x=1}^N (x + 1)$	Es wird für den Term $(x+1)$ die Summe von $x = 1$ bis $x = N$ gebildet
$\Delta d_{n,m}$	Differenz von Werten, hier Abstand zwischen den Koordinaten n und m

Vektoren werden mit einem Pfeil über einem kleinen lateinischen Buchstaben dargestellt.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Jedes Jahr führen Fahrzeugunfälle zu etwa 1,2 Millionen Toten und nochmal deutlich mehr Verletzten, wodurch sie zu einem der größten gesundheitlichen Probleme der modernen Gesellschaft werden (Fang et al. 2017). Dementsprechend hat der Schutz von Personen die größte Priorität im Straßenverkehr. Die Automobilhersteller stehen vor der stetig wachsenden Herausforderung, Fahrzeuge immer sicherer zu gestalten. Zudem steigen die Anforderungen im Bereich der Elektromobilität, insbesondere hinsichtlich des Batterieschutzes. Gleichzeitig müssen die Fahrzeuge ökonomisch wettbewerbsfähig sein.

Bei der Auslegung dieser Fahrzeugstrukturen spielt die Topologieoptimierung eine bedeutende Rolle. Besonders die Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung (GHT) hat sich bei der Optimierung von crashbelasteten Profilstrukturen bewährt (Ortmann und Schumacher 2013; Ortmann 2015; Ortmann et al. 2021). Durch eine Optimierung mit der GHT können Fahrzeuge sicherer werden, da Anforderungen, die bislang nicht erfüllt werden, damit erreicht werden können. Zusätzlich können beliebige Optimierungsziele, beispielsweise die Minimierung der Masse, verfolgt werden, sodass leichte Strukturen erzeugt werden. Die GHT findet ihren Einsatz zur Optimierung von Seitenschwellern, Stoßfängern, Crashboxen sowie Längsträgern und beim Batterieschutz von Elektrofahrzeugen.

Durch die Optimierung von Karosseriestrukturen im Automobilbereich leistet die GHT einen wertvollen Beitrag zur Weiterentwicklung von Leichtbaumöglichkeiten. Leichtbau bietet als Schlüsseltechnologie branchenübergreifende Innovationsmöglichkeiten zur Ressourcen- und Energieeffizienz.

Bislang ist die GHT auf die Optimierung von Profilstrukturen beschränkt, die mit Strangpressen hergestellt werden. Als Werkstoff dient üblicherweise Aluminium mit seinen guten Leichtbau- und Strangpresseigenschaften. Aufgrund der steigenden Leichtbauanforderungen in der Automobilbranche werden in Fahrzeugkarosserien vermehrt hochfeste Metalle verbaut. Dementsprechend sind auch besonders in Craschanwendungen Profilstrukturen aus hochfesten Metallen von Interesse.

Bei vergleichbaren Kosten können Blechstrukturen höhere Festigkeiten haben als ein Strangpressbauteil. Die Herstellung von Profilstrukturen aus hochfestem Stahl oder Aluminium kann fertigungstechnisch jedoch eine Herausforderung darstellen. Prinzipiell können Profilstrukturen aus geeigneten Stahllegierungen mit Strangpressen und

Glas als Schmierfilm hergestellt werden (Dietrich 2018). Der Schmierfilm reduziert die Reibung und dient als Kühlmittel, wodurch die thermische Belastung und der Verschleiß verringert werden. Diese Technik wird zum jetzigen Zeitpunkt aus wirtschaftlichen Gründen nicht in der Serienfertigung eingesetzt.

Die klassische Strangpressbarkeit von hochfesten Stählen unterliegt aufgrund ihrer schlechten Pressbarkeit engen Grenzen (Laue und Stenger 1976). Hinzu kommt, dass bei der geringen Strangpressgeschwindigkeit von hochfesten Stählen gegebenenfalls nicht mehr wirtschaftlich produziert werden kann. Letztlich kann Strangpressen zum jetzigen Zeitpunkt nicht zuverlässig zur Fertigung von Profilstrukturen aus hochfesten Stählen verwendet werden.

Profilstrukturen aus verbundenen Blechen haben den Vorteil, dass sie problemlos mit Flanschen versehen werden können, an denen sie mit den umliegenden Fahrzeugstrukturen im Zusammenbau gefügt werden können, und sie entweder aus Stahl oder Aluminium gefertigt werden können. Die Entscheidungsfreiheit in der Materialauswahl kann aufwendige Mehrarbeit und Schutzvorkehrungen ersetzen, die notwendig sind, um Bimetallkorrosion zu verhindern, wenn unterschiedliche Metalle wie Stahl und Aluminium in Kontakt sind. Außerdem sind – abhängig vom Fertigungsverfahren – Querschnittsänderungen in der Längsrichtung von Profilen aus verbundenen Blechen möglich. Diese Flexibilität in der Gestaltung ist ein großer Vorteil gegenüber stranggepressten Profilstrukturen.

Damit diese Vorteile in der Optimierung genutzt werden können, wird in dieser Dissertation die Methodik der GHT um Profilstrukturen aus verbundenen Blechen erweitert.

2 Stand der Forschung

2.1 Grundlagen der Strukturoptimierung

In diesem Abschnitt wird eine Einführung in die Strukturoptimierung gegeben. In diesem Zusammenhang werden relevante Abläufe und Begriffe erläutert, es wird jedoch nicht der vollständige Stand der Technik dargestellt.

In der Strukturoptimierung werden Analysemodelle benutzt, um die Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften eines Systems zu beschreiben. Diesen Modellen liegen analytische oder numerische Ansätze zugrunde. Das am meisten verwendete numerische Verfahren ist die Finite-Elemente-Methode (FEM). Eine Berechnung eines FE-Modells wird auch FE-Simulation oder nur Simulation genannt.

Zur Lösung der Systemgleichung einer FE-Simulation gibt es den expliziten und impliziten Ansatz. Bei letzterem Lösungsverfahren wird die Systemgleichung nach dem Verschiebungsvektor gelöst (Schumacher 2020). Dies setzt eine Invertierung der Steifigkeitsmatrix voraus, wofür viel Speicherplatz und Zeit benötigt werden. Für komplexere Modelle ist der Zeitaufwand so groß, dass der implizite Lösungsansatz nicht mehr praktikabel ist. Bei Nichtlinearitäten in der Simulation kann es zudem schwierig sein die Konvergenz zu erreichen, wodurch die Genauigkeit der Ergebnisse beeinträchtigt werden kann.

Hier kann das explizite Lösungsverfahren verwendet werden, das den Zustand eines Systems iterativ für jeden Zeitschritt berechnet. Es ist effizient wenn eine hohe zeitliche Auflösung gewünscht ist, wie es zum Beispiel bei Crash-Simulationen der Fall ist.

Die Simulation aller Lastfälle eines FE-Modells wird als Funktionsaufruf bezeichnet. Die Ergebnisse einer FE-Simulation einer mechanisch belasteten Struktur können beispielsweise Verformungen und Spannungen sein, die Strukturantworten genannt werden.

Die in einer Optimierung vom Optimierungsalgorithmus zu verändernden Parameter werden Entwurfsvariablen genannt. Klassische Entwurfsvariablen verändern in der Strukturoptimierung die Topologie, Form und Dimension der Struktur (s. Abbildung 2-1). Die Topologie bezeichnet die Lage und Anordnung geometrischer Strukturen zueinander. In der Topologieoptimierung wird die bestmögliche Lage und Anordnung von Strukturen bestimmt. Eine Änderung der Topologie ist möglich indem eine Aussparung in die Struktur eingebracht wird oder eine Teilstruktur in das Modell eingefügt oder aus diesem entfernt wird. In einer Formoptimierung wird die Geometrie der Struktur verändert. Die Entwurfsvariablen in der Formoptimierung sind beispielsweise die Position von Verbindungsknoten einzelner Teilstrukturen oder weitere geometrische

Parameter wie Radien. In einer Dimensionierung werden Wandstärken optimiert oder Querschnitte in der Größe skaliert.

Die Optimierungsschleife in Abbildung 2-2 zeigt den Ablauf einer Optimierung. Vor dem Beginn muss das Optimierungsproblem definiert werden. Dieses besteht aus einer Zielfunktion und Restriktionen. Die Zielfunktion ist die mathematische Beschreibung eines Auslegungsziels (Schumacher 2020), also beispielsweise die Minimierung einer Strukturantwort eines Analysemodells. Es können Restriktionen definiert werden, die die Strukturantworten oder Entwurfsvariablen einschränken. Die Optimierung beginnt mit einer Berechnung des Analysemodells. Aus diesem werden die Strukturantworten extrahiert. Solange das Abbruchkriterium nicht erfüllt ist, werden die Entwurfsvariablen vom Optimierungsalgorithmus verändert und die Schleife beginnt erneut. Wenn das Abbruchkriterium für die Optimierung erreicht ist stoppt die Optimierung und der finale Entwurf wurde gefunden.

Es existiert eine Vielzahl mathematischer Optimierungsalgorithmen, die – abhängig von der Optimierungsaufgabe – unterschiedlich effizient sind. Differenziert wird zwischen lokalen und globalen Optimierungsalgorithmen. Erstere sind effizient im Finden des lokalen Minimums. Ein Beispiel dafür sind auf Gradienten basierende Algorithmen wie die Methode des steilsten Abstiegs, bei der die Steigung im aktuellen Punkt (Sensitivität) der Zielfunktion verwendet wird, um den Weg zum lokalen Minimum zu finden. Die Sensitivitäten sind die nach den Entwurfsvariablen abgeleiteten Ziel- und Restriktionsfunktionen. Sie geben an, wie sich die Zielfunktion bei einer Änderung der Entwurfsvariablen verhält. Auf Gradienten basierende Algorithmen können nur sinnvoll für konvexe Funktionen eingesetzt werden, da sie ein lokales Minimum meistens nicht mehr verlassen können. Sobald es mehrere lokale Optima gibt, kann das globale Optimum gegebenenfalls nicht mehr gefunden werden. Bei nicht konvexen Zielfunktionen ist der Startpunkt des lokalen Optimierungsalgorithmus entscheidend für das Ergebnis.

Für nicht konvexe Zielfunktionen eignen sich globale Optimierungsalgorithmen, zum Beispiel Evolutionsalgorithmen. Diese bilden die Evolution mit Mutationen (Veränderungen), Selektionen (Auswahl) und Rekombination (Beteiligung früherer Generationen) nach (Schumacher 2020). Die Elternentwürfe dienen als Basis für neue Nachkommen, die mit Funktionsaufrufen bewertet werden. Die besten Nachkommen dienen wiederum als Elternentwürfe für eine neue Generation. Die globalen Optimierungsverfahren decken einen größeren Entwurfsraum ab, jedoch benötigen sie deutlich mehr Funktionsaufrufe als lokale Optimierungsalgorithmen.

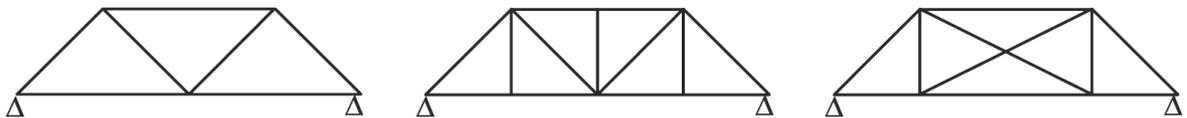
In dem Optimierungsprogramm LS-OPT von Ansys wird standardmäßig der Algorithmus *Sequential Response Surface Method* (SRSM) verwendet, der den Entwurfsraum, in dem nach dem Optimum gesucht wird, iterativ anpasst (LS-OPT manual 2021). Zu

Beginn wird mit einem benutzerdefinierten Skalierungsfaktor die Größe des Entwurfsraums festgelegt. Danach wird zum Beispiel der Sampling-Algorithmus *Space-Filling* genutzt, um die Stützstellen im Entwurfsraum zu bestimmen (LS-OPT manual 2021). Dabei werden die Stützstellen so positioniert, dass der kleinste Abstand zwischen allen Stützstellen maximiert wird. Jede Stützstelle besteht aus einer Kombination von Werten der Entwurfsvariablen.

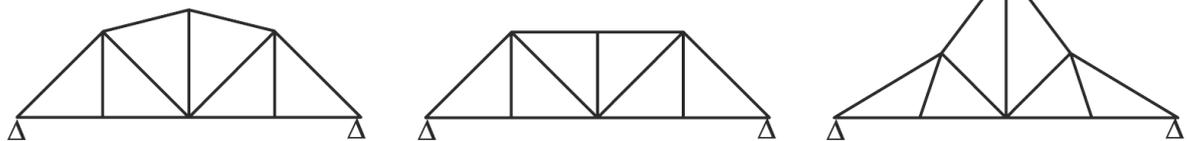
Alle ermittelten Stützstellen werden mit einer Simulation bewertet, auf deren Grundlage ein Metamodell mit linearen oder quadratischen Polynomen erzeugt wird. Das Metamodell ist eine globale Approximation der Ziel- und Restriktionsfunktionen. Auf dem Metamodell wird der Optimierungsalgorithmus *Adaptive Simulated Annealing* (adaptive simulierte Abkühlung) angewendet, um das approximierte Optimum zu berechnen (LS-OPT manual 2021). ASA ist ein globaler Optimierungsalgorithmus, der den Abkühlungsprozess von Metallen nachahmt.

Jetzt wird die SRSM verwendet, um den Entwurfsraum, in dem nach dem Optimum gesucht wird, weiter einzuschränken. Dies geschieht, indem in das Suchfenster gezoomt wird, es verschoben wird oder auch beides gleichzeitig durchgeführt wird. Danach beginnt die nächste Iteration mit einem *Sampling* des verkleinerten Entwurfsraums. Wenn das Abbruchkriterium erfüllt ist, stoppt die Optimierung

Topologieoptimierung:



Formoptimierung:



Dimensionierung:

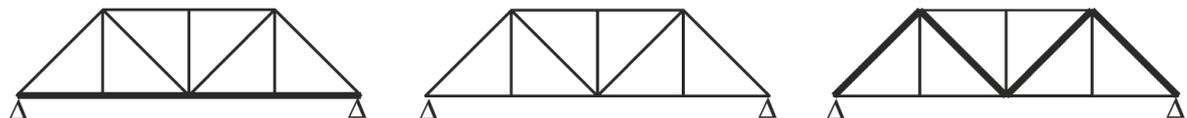


Abbildung 2-1: Klassifizierung von Strukturoptimierungsaufgaben nach der Art der Entwurfsvariablen (Schumacher 2020)

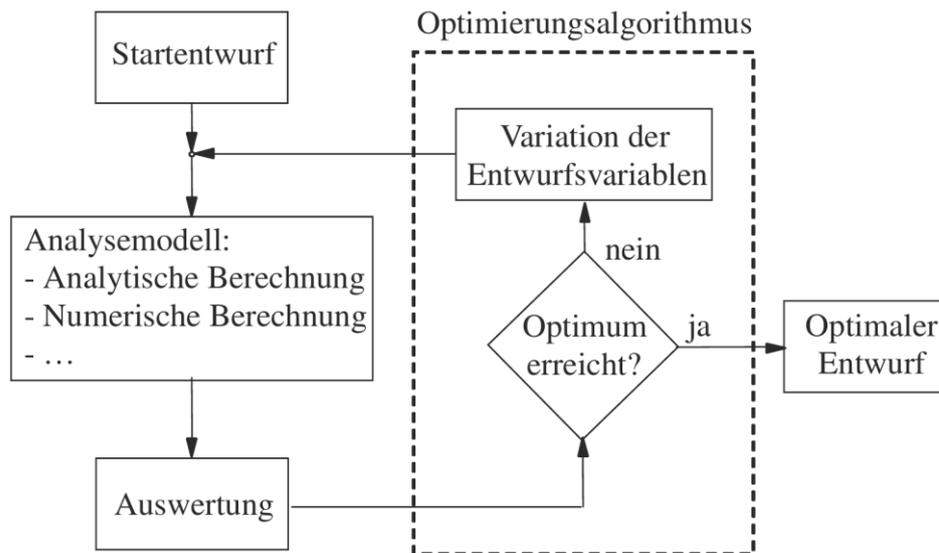


Abbildung 2-2: Optimierungsschleife (Schumacher 2020)

2.2 Topologieoptimierung mit linearen Finite Elemente Modellen

Die am meisten verwendete Methode zur Topologieoptimierung von linear statisch belasteten Strukturen ist der Ansatz *Solid Isotropic Material with Penalization* (SIMP), der auf den Untersuchungen von Bendsoe und Kikuchi (Bendsøe und Kikuchi 1988) sowie von Rozvany und Zhou (Rozvany et al. 1992) basiert. Dabei wird der Entwurfsraum in viele kleine Elemente aufgeteilt. Die Dichte jedes Elements dient als Entwurfsvariable und kann von 0 (kein Material) bis 1 (Vollmaterial) variieren. Sie steuert die Eigenschaften der Elemente, zum Beispiel die Steifigkeit, nach vorher festgelegten Regeln. Die Sensitivitäten werden auf Basis der FE-Systemgleichung semianalytisch bestimmt; dies ist jedoch nur mit dem impliziten Berechnungsverfahren möglich. Basierend auf den mit Sensitivitäten erstellten Ersatzfunktionen ermittelt ein Optimierungsalgorithmus iterativ neue Entwürfe. Sobald das Abbruchkriterium erreicht ist, in der Regel die Erfüllung der sogenannten Kuhn-Tucker-Bedingungen (Schumacher 2020), und eine Verbesserung der Zielfunktion zur vorherigen Iteration ausbleibt, wird die Optimierung gestoppt und der beste Entwurf wird zurückgegeben. Es ist möglich, eine Restriktion in Form einer Extrusionsrichtung anzugeben, wodurch Profilstrukturen erzeugt werden können. Das Ergebnis der Topologieoptimierung muss vom Benutzer interpretiert und in ein kontinuierliches sowie geglättetes Geometriemodell überführt werden, wofür ein ingenieurmäßiges Verständnis notwendig ist, damit sich eine herstellbare Struktur ergibt.

2.3 Topologieoptimierung unter Crashbelastung

Die Anwendung der SIMP-Methode auf crashbelastete Strukturen ist nicht praktikabel, da aufgrund einer Vielzahl von Nichtlinearitäten und Bifurkationen die Sensitivitäten nicht mehr sinnvoll verwendet werden können. Zu den Nichtlinearitäten zählen:

- Plastizität
- Materialversagen
- Dehnratenabhängigkeit
- große Verformungen
- Nachbeulverhalten
- Kontaktphänomene

Aus diesem Grund wurden andere Methoden für die Optimierung von crashbelasteten Strukturen entwickelt, die im Weiteren vorgestellt werden.

Die topologische Ableitung in der Optimierung von crashbelasteten Strukturen kommt der Sensitivität, die in der linear statischen Topologieoptimierung verwendet wird, am nächsten.

Die topologische Ableitung als Sensitivität ermöglicht die Bewertung des Einflusses einer infinitesimalen Aussparung der Struktur auf ein Funktional. Die Aussparung wird rein fiktiv erzeugt, um den strukturmechanischen Einfluss festzustellen. Die Entwicklung der topologischen Ableitung basiert auf der Bubble-Methode von Eschenauer et al. 1994, wo sie als Positionierungskriterium bezeichnet wird. Die Auswertung dieser Sensitivität für sämtliche Punkte im Bauraum liefert Informationen darüber, an welchen Stellen die Integration einer Aussparung für ein Optimierungsproblem sinnvoll ist. Ein wesentlicher Vorteil dieser Sensitivität liegt in der klaren Definition der Strukturgrenzen ohne Material mit unterschiedlichen Dichten. Die Erweiterung auf große Verschiebungen, Verformungen und Materialnichtlinearitäten erfolgte durch Weider 2021.

Pedersen diskretisiert den Bauraum in seinem *Ground-Structure*-Ansatz mit Balkenelementen, die an Knoten miteinander verbunden und gleichmäßig im zweidimensionalen Bauraum verteilt sind (Pedersen 2003b, 2003a). In der Optimierung können Balken entfernt und der Querschnitt der Balken kann verändert werden. Der Kontakt zwischen den Balkenelementen und die Dehnratenabhängigkeit werden nicht berücksichtigt. Es werden jedoch große Verformungen und die Plastizität der Balkenelemente durch plastische Gelenke einbezogen. Diese Annahmen ermöglichen es die implizite Zeitintegration und somit analytische Sensitivitäten zu verwenden. Das Ziel der Optimierung ist es den Verlauf der Kraft-Verschiebungs-Funktion an eine vorgegebene Kurve anzugleichen.

Die *Equivalent Static Loads Method for Non Linear Static Response Structural Optimization* (ESLSO) wurde von Park vorgestellt (Park 2011). Mit einer nichtlinearen dynamischen Analyse wird das Verschiebungsfeld einer Struktur in einem vorgegebenen Crashlastfall berechnet. Die statische Ersatzlast (ESL) wird durch Multiplizieren der Steifigkeitsmatrix mit diesem Verschiebungsfeld erzeugt. Sie ist definiert als statische Last, die das gleiche Verschiebungsfeld wie eine nicht lineare FE-Simulation erzeugt. Es können ESL für mehrere Zeitpunkte der Crashesimulation erzeugt werden, die als eigene Lastfälle für eine lineare Topologieoptimierung dienen. Für den besten Entwurf der Optimierung wird eine Crashesimulation durchgeführt und die dazugehörigen ESL werden bestimmt, sodass eine neue Optimierung in der nächsten Iteration starten kann. Dies findet so lange statt, bis das Konvergenzkriterium erfüllt ist. Der vermeintliche große Vorteil der ESL ist, dass ein hochdynamisches nicht lineares Problem in ein linear statisches Problem überführt wird, wodurch vor allem die Berechnungszeit reduziert werden kann (Fang et al. 2017). Aufgrund der getroffenen Annahmen und Vereinfachungen bestehen jedoch Einschränkungen für die Methode (Fang et al. 2017). Der größte Nachteil der Methode ist, dass die Ersatzlasten immer auf Grundlage der undeformierten Ausgangsgeometrie berechnet werden (Triller et al. 2021). Außerdem müssen für die Strukturantworten, beispielsweise Schnittkräfte, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, die nicht im linear statischen Bereich definiert sind, sinnvolle Approximationen gefunden werden.

Mit der *Difference-based Equivalent Static Loads*(DiESL)-Methode hat Triller einen neuen Ansatz entwickelt um die ESL zu berechnen und damit die Approximation zu verbessern (Triller et al. 2021). Dies wird erreicht, indem zur Erzeugung der ESL der zeitabhängige nicht lineare Verschiebungsweg der Knoten verwendet wird. Um eine ESL für einen Zeitschritt zu berechnen, nutzt er das Verschiebungsfeld eines vorherigen Zeitschritts und nicht wie bei der klassischen ESLSO das Verschiebungsfeld ausgehend vom undeformierten Zustand. Dadurch sind die Kräfte der ESL deutlich geringer, weil sie nicht mehr so große Deformationen erzeugen müssen, wodurch die linear statische Approximation des Strukturverhaltens verbessert wird. Es werden die Zeitschritte, zu denen die ESL erzeugt werden, adaptiv so gewählt, dass die Kurve, die das nicht lineare Verhalten der Struktur beschreibt, durch die Zeitschritte angepasst wird (Triller 2023).

Die DiESL-Methode führt im Vergleich zur klassischen ESL-Methode zu einer deutlichen Verbesserung der nicht linearen Approximation und zu einer schnelleren Konvergenz zum Optimum (Triller et al. 2021). Die oben genannten Einschränkungen der ESL-Methode bleiben jedoch bestehen.

Clemens stellte eine Methode zur Form- und Topologieoptimierung crashbelasteter Tiefziehbleche vor (Clemens und Schumacher 2023). Die Optimierung wird in eine innere und eine äußere Schleife unterteilt. In der äußeren Schleife wird eine dynamische, nicht lineare FE-Berechnung der Blechstruktur beim Crash durchgeführt. Die dabei für mehrere Zeitpunkte ermittelten Kontaktkräfte werden in der inneren Schleife als Lastfälle für eine statische lineare Topologieoptimierung verwendet, bei der eine Fertigungsrestriktion für Tiefziehbleche (Dienemann 2018) eingesetzt wird. Das Resultat der Topologieoptimierung ist ein Voxel-Ergebnis, das für die nächste Iteration der äußeren Schleife automatisiert wieder in ein Schalenmodell zur Crashberechnung überführt wird. Clemens zeigt mit seinen Optimierungsergebnissen, dass die Intrusion mit der Methode erfolgreich reduziert werden kann.

Bei der *Hybrid-Cellular-Automata*(HCA)-Methode wird ein heuristischer Ansatz genutzt, um die Energieabsorption einer Struktur gleichmäßig zu verteilen und zu maximieren, während gleichzeitig die Deformation der Struktur minimiert wird (Patel et al. 2009). In der kommerziellen Software LS-TaSC von Ansys (LS-TaSC manual 2018) wurde die Methode implementiert. Für die Optimierung wird der Bauraum mit Voxeln diskretisiert, wobei jedes Voxel die Informationen seiner Nachbarn nutzt. Die Dichte der Voxel kann sich zwischen Hohlraum und Vollmaterial bewegen. Zu Beginn einer Iteration wird eine explizite Crashsimulation des Modells durchgeführt und die innere Energiedichte für alle Voxel des Bauraums wird berechnet. Danach wird die Dichte der Voxel unter Berücksichtigung der Massenrestriktion so angepasst, dass die Dichte von Voxeln mit einer unterdurchschnittlichen Energiedichte reduziert und die Dichte von Voxeln mit einer überdurchschnittlichen Energiedichte erhöht wird. Die HCA-Methode eignet sich nur begrenzt zur Optimierung von Profilstrukturen, da die Voxel das Deformationsverhalten von dünnwandigen Profilstrukturen nicht gut repräsentieren können. Ein weiterer Nachteil ist, dass Fertigungsrestriktionen nur eingeschränkt berücksichtigt werden können und die Ergebnisse der Optimierung nachträglich interpretiert werden müssen, um eine fertigbare Struktur zu erhalten. Die mit der HCA angestrebte gleichmäßige Energieverteilung ist bei crashbelasteten Strukturen in der Regel nicht vorhanden und auch nicht gewünscht, da das Deformationsverhalten zu komplex ist, als dass solch eine generalisierte Aussage getroffen werden könnte. Wenn jedoch das Ziel die Maximierung der Steifigkeit ist, kann eine gleichmäßige Energieverteilung wieder sinnvoll sein.

Eine Abwandlung dieser Methode ist HCA TWS (*Hybrid Cellular Automata for Thin Walled Structures*), bei der die Diskretisierung nicht mit Voxeln, sondern mit Schalenelementen stattfindet, die in einem Raster gleichmäßig im Bauraum verteilt sind (Hunkeler et al. 2013).

Ein deutlich anderer Ansatz ist die Verwendung von mathematischen Graphen zur Beschreibung der Geometrie der Struktur. In der Methode *Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung* (GHT) werden aus Expertenwissen abgeleitete Heuristiken und mathematische Optimierungsverfahren kombiniert, um lateral crashbelastete Profilstrukturen zu optimieren (Ortmann und Schumacher 2013, Ortmann 2015, Ortmann et al. 2021). Als Heuristik wird eine auf Erfahrungswerten basierende Regel bezeichnet, die es ermöglicht, Aussagen über die Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften eines Systems zu treffen. Mit Heuristiken werden unter Verwendung der flexiblen Graphen Änderungen an der Topologie, Form oder Dimension der Struktur durchgeführt. Angefangen bei dem Startentwurf, werden die Heuristiken auf alle Entwürfe der aktuellen Iteration angewendet. Heuristiken verwenden unter anderem Daten aus der FEM-Berechnung des jeweiligen Entwurfs und die Änderung der Geometrie wird auf deren Grundlage durchgeführt. Die Fertigungsrestriktionen für das Strangpressen werden berücksichtigt, sodass nur fertigbare Entwürfe entstehen. In der GHT werden unterschiedliche Arten von Nichtlinearitäten, beispielsweise große Verformungen, Kontakt, Versagenskriterien und nicht lineares Materialverhalten, berücksichtigt (Ortmann und Schumacher 2013). Da die GHT einen heuristischen Optimierungsansatz verwendet, wird in der Regel nicht das Optimum, sondern nur ein guter Entwurf gefunden.

Schneider hat die GHT für den Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden erweitert (Schneider 2023). Die einzelnen Profilkammern werden gewickelt und zu einer Profilstruktur zusammengesetzt. Mit seinen neu entwickelten Heuristiken kann er nicht nur die Querschnittstopologie, sondern auch die Dicke und den Lagenaufbau der einzelnen Profile verändern.

Durch die Arbeiten von Sperber können axial belastete Profilstrukturen mit der GHT optimiert werden, die beispielsweise ihre Anwendung als Crashbox finden (Sperber 2022).

Beyer hat die GHT für die Verwendung von dreidimensionalen Graphen erweitert und ermöglicht das Finden von 3D-Layouts von aus Einzelprofilen bestehenden Strukturen (Beyer et al. 2021). Die Topologieänderungen beziehen sich vor allem auf das Einbringen und Entfernen von Profilstrukturen. Für die Geometrierepräsentation im Dreidimensionalen wurden die Heuristiken neu konzipiert. Innerhalb des Verfahrens können Wandstärken- und Formoptimierungen erfolgen, aber auch das Skalieren von Querschnitten ist möglich. Außerdem werden komplexe Durchdringungsprüfungen verwendet und geometrische Restriktionen berücksichtigt. Seine Arbeit findet Anwendung in der frühen Konzeptionsphase von Fahrzeugkarosserien.

2.4 Konstruktionsregeln für crashbelastete Schalenstrukturen

In diesem Abschnitt wird eine Einführung in die für diese Arbeit relevante Schalenbauweise von Strukturen gegeben. In diesem Zusammenhang werden die relevantesten Grundlagen und Konstruktionsregeln vorgestellt, es wird jedoch nicht der vollständige Stand der Technik dargestellt.

Prinzipielle Bauweise

Zwei der konstruktiven Aufbautechniken im Strukturleichtbau sind die Integral- und die Differentialbauweise (s. Abbildung 2-3). Bei der Integralbauweise werden möglichst viele Funktionen und Teilstrukturen ohne Fügetechnik in einer Struktur versucht zu integrieren. Dementsprechend sind solche Strukturen komplex gestaltet.

Im Rahmen der Differentialbauweise werden hingegen oft weniger komplexe Bleche verwendet und sie werden an Überlappungen miteinander gefügt (Schweißen, Kleben und Nieten).

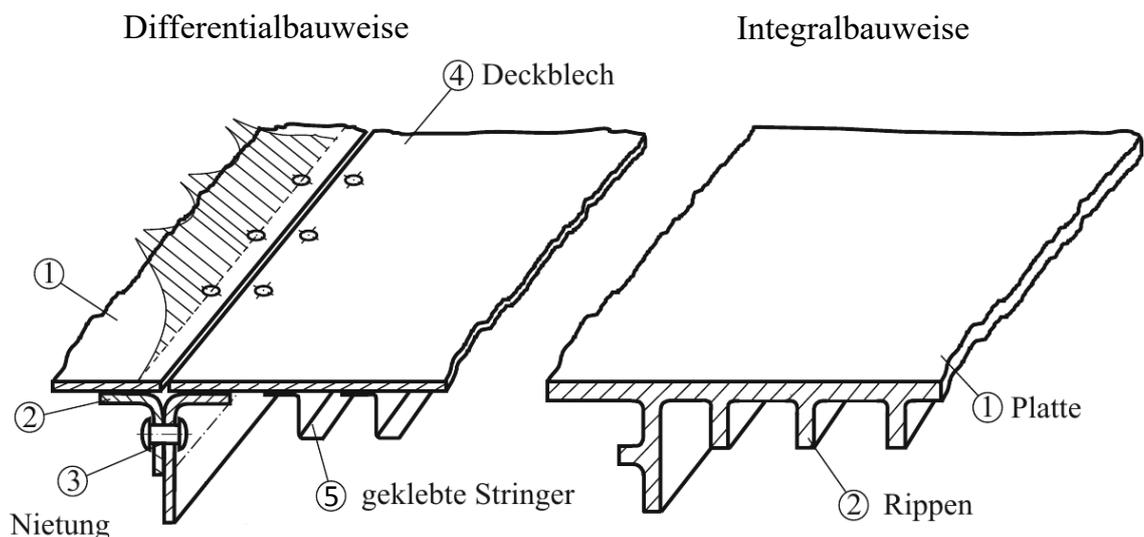


Abbildung 2-3: Differentialbauweise und Integralbauweise im Vergleich am Beispiel der Kabinenbodenstruktur eines Verkehrsflugzeugs – links als Multi-Verbindungslösung, rechts als einstückige Strangpresslösung (verändert, nach Klein und Gänsicke 2019)

Die Differentialbauweise findet Anwendung im Blechleichtbau (Klein und Gänsicke 2019). Die Vorteile sind, dass standardisierte Einzelkomponenten verwendet werden können, die aus verschiedenen Werkstoffen bestehen. Unterschiedliche Werkstoffpaarungen müssen jedoch im Hinblick auf Fügbarkeit und Kontaktkorrosion hinterfragt

werden und können gegebenenfalls nicht miteinander verwendet werden oder es müssen entsprechende Maßnahmen getroffen werden, um dem entgegenzuwirken. Ein Nachteil der Differentialbauweise sind die Blechdickendopplungen an Fügestellen, die strukturmechanisch oft keinen Beitrag leisten und nur das Gewicht erhöhen. Außerdem sind zusätzliche Arbeitsgänge für die Fügeprozesse notwendig, die jedoch im Kontrast zu der aufwendigeren Herstellung bei der Integralbauweise stehen. Als Fertigungsverfahren für die Integralbauweise können beispielsweise das Strangpressen, das Gießen oder auch die additive Fertigung verwendet werden.

Materialauswahl und Fertigungsverfahren für Blechstrukturen

Karosserie und Fahrwerk eines Automobils wiegen durchschnittlich mehr als die Hälfte des gesamten Fahrzeugs (Maw 2018). Die Wahl geeigneter Materialien ist also eine relevante Entscheidung, die direkt Einfluss auf das Gewicht, die Festigkeit und die Steifigkeit der Gesamtkonstruktion hat. Aluminium hat beispielsweise eine geringere Dichte als Stahl, die Zugfestigkeit von Stahl kann aber um ein Vielfaches höher liegen. Bauteile aus Aluminium müssen also im Vergleich zu Bauteilen aus Stahl dicker ausgelegt werden, damit sie ihre Anforderungen erfüllen. Dieser Effekt kann so weit gehen, dass sich der Vorteil von Aluminium gegenüber Stahl nahezu aufhebt. Die Kosten für ein Bauteil aus Aluminium sind in der Regel deutlich höher. Ein Vorteil von Aluminium gegenüber Stahl, bei gleicher Masse und damit größerer Dicke der Bleche, ist der Effekt, dass damit ein größeres Flächenträgheitsmoment und somit eine größere Biegesteifigkeit erzielt wird. Auch das Beulverhalten ist damit deutlich besser.

Es existiert eine Vielzahl von umformenden Fertigungsverfahren, die zur Herstellung von Karosseriebauteilen verwendet werden können. Zur Herstellung von Blechbauteilen für die Schalenbauweise wird vor allem das Tiefziehen verwendet. Abhängig von der Komplexität der Bauteile kann auch das Schwenkbiegen oder das Rollformen für Profilstrukturen genutzt werden.

Die Festigkeit des Blechs spielt bei der Fertigung eine entscheidende Rolle. Allgemein gilt: Je höher die Festigkeit, desto restriktiver ist das Prozessfenster in der Herstellung der Bauteile. Eine höhere Materialfestigkeit führt bei Belastung des Bauteils zu einem späteren Versagen. Stähle mit höheren Festigkeiten haben prinzipiell eine geringere Bruchdehnung als solche mit niedrigeren Festigkeiten. Eine große Bruchdehnung des Bauteils ist wünschenswert, da dadurch in Crashlastfällen die strukturelle Integrität des Bauteils länger besteht und somit länger Energie aufgenommen werden kann. Sobald die strukturelle Integrität des Bauteils nicht mehr vorhanden ist, nimmt die Energieaufnahme in der Regel rapide ab.

Vermeiden von Korrosion

Wenn Metalle unterschiedlicher Standardpotentiale miteinander Kontakt haben, kann Kontaktkorrosion auftreten (National Physical Laboratory 2000). Dies geschieht, da Feuchtigkeit als Elektrolyt fungiert und sich eine elektrische Spannung aufbaut, die zur Korrosion des unedleren Metalls führt. Bei Stahl-Aluminium-Paarungen kann dies verhindert werden, sofern eine geeignete Fügetechnik und Schutzbeschichtung verwendet wird (Gullino et al. 2019). Dies ist mit Aufwand verbunden und deswegen ist es von Vorteil, wenn die Anzahl verschiedener Werkstoffe in einer Baugruppe reduziert wird. Stahlbleche sind meistens verzinkt, sodass Korrosion vorgebeugt wird, Aluminiumbleche werden im Karosseriebau in der Regel nicht beschichtet (Gullino et al. 2019). Wenn Hohlräume Feuchtigkeit ausgesetzt sind, müssen Öffnungen vorgesehen werden, die eine gute Belüftung ermöglichen. Ein Ablauf des Wassers sollte konstruktiv immer möglich sein. Dazu können Verprägungen genutzt werden, die die Kontaktfläche zwischen aufeinanderliegenden Blechen nur lokal herstellen und diese somit reduzieren, wodurch eine Art Belüftungsöffnung geschaffen wird. Die Belüftungsöffnungen ermöglichen bei der kathodischen Tauchlackierung (KTL) den Lackeintrag in den Hohlraum und sorgen auch wieder für den Abfluss des überflüssigen Lacks (Braess 2011). Bei der KTL handelt es sich um ein elektrochemisches Verfahren zur Lackierung aufwendiger Strukturen, die zum Korrosionsschutz von Fahrzeugkarosserien eingesetzt wird.

Verfahren zum Fügen von Blechen

Die Fügstellen sind oft die Schwachstellen der Struktur. Dementsprechend spielt das Fügen von Blechen eine bedeutende Rolle dahingehend, die strukturelle Integrität möglichst lange während der Verformung im Crash zu erhalten.

Um Bleche miteinander zu verbinden, werden Flansche verwendet. Als Flansch wird in diesem Zusammenhang der Teilabschnitt eines Blechs bezeichnet, der konstruktiv so gestaltet ist, dass mehrere Bleche dort miteinander gefügt werden können. Typischerweise werden beim Fügen von Metallen Stumpf-, Überlapp- und Bördelstöße verwendet, wobei Überlapp- und Bördelstöße aufgrund ihrer größeren Fügertoleranzen bevorzugt werden (s. Abbildung 2-4).

Der Großteil der Verbindungen in Fahrzeugkarosserien wird durch Schweißen erzeugt, wobei Widerstandspunktschweißen im Vergleich zu den anderen Verfahren aufgrund seiner Schnelligkeit, Wirtschaftlichkeit und Robustheit gegenüber Bauteiltoleranzen bevorzugt wird (Cui et al. 2015). Ein modernes Automobil hat 2000 bis 5000 Schweißpunkte (Pouranvari und Marashi 2013). Das Fügen durch Schweißen von Blechen gleicher Werkstoffe, wie Stahl oder Aluminium, gehört zum Stand der Technik und wird in der Automobilindustrie voll automatisiert eingesetzt. Verbindungen von Bauteilen,

die aus mehreren Metallen bestehen und mit aktuellen Verbindungstechniken der Automobilindustrie gefügt werden, sind von ihrer mechanischen Belastbarkeit jedoch stark begrenzt (Gullino et al. 2019). Ein Beispiel ist das Schweißen von Aluminium mit Stahl, das wegen der großen Unterschiede der physikalischen und thermischen Eigenschaften problematisch ist (Ling et al. 2016). Die in dem Fügeprozess entstehenden intermetallischen Verbindungen sind plastisch nur sehr gering verformbar und spröde (Gullino et al. 2019). Das Schweißen von Aluminium und Stahl ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht sinnvoll umsetzbar, da es immer mit Restriktionen verbunden ist. Die Kombination von Stahl- und Aluminiumblechen wird normalerweise in der Automobilindustrie geklebt oder mittels Formschluss (Nieten, Schrauben) verbunden (Kusuda 2013).

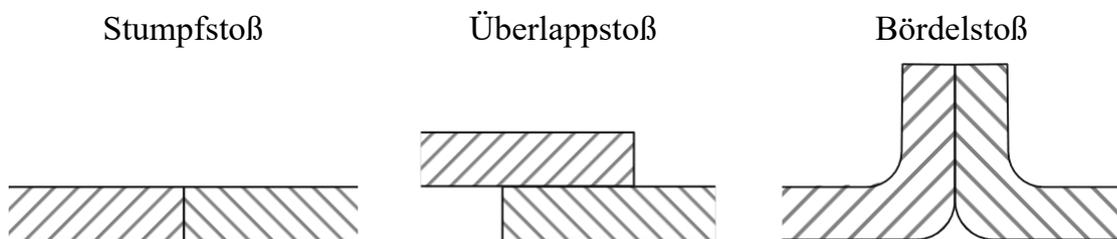


Abbildung 2-4: Stoßarten von Flanschen bei Blechen

Ein Verfahren, um Stahl- und Aluminiumbleche miteinander zu fügen, wurde im Volkswagen Passat eingesetzt. Dort konnte eine Aluminium-Hutablage mit den umgebenden Stahlblechen in Serienfertigung verbunden werden (Huland et al. 2015). Bei diesem Verfahren wird das Aluminiumblech mit einem oder mehreren Stahlnieten versehen, an denen es mit dem Stahlblech mit Widerstandspunktschweißen gefügt wird (Ling et al. 2016). Ein direktes Fügen von Aluminium und Stahl findet jedoch nicht statt.

Honda hat Reibrührschweißen in der Serienfertigung des Accord-2013-Modells verwendet, um Teile des Vorderrahmens aus Aluminium und Stahl miteinander zu verbinden (Kusuda 2013). Im Vergleich zum Einsatz von Schrauben ist der Vorderrahmen des Accords um 25 % leichter. Sowohl Aluminium als auch Stahl werden in dem Prozess nur plastifiziert und bilden keine Schmelze. Das rotierende Werkzeug dringt nur unmittelbar in das Stahlblech ein, wodurch nur seine Oberfläche plastifiziert wird.

Neben dem Widerstandspunktschweißen wird in der Automobilindustrie vermehrt das Laserstrahlschweißen zum Fügen von Blechen eingesetzt. Laserstrahlschweißen ist vom Gesichtspunkt der mechanischen Belastbarkeit zu bevorzugen. Punktschweißen hingegen zeichnet sich durch weniger strikte Zusammenbautoleranzen und geringere Werkzeug- und Betriebskosten aus (Gullino et al. 2019).

Das Laserstrahlschweißen kann auch bei nur einseitig zugänglichen Fügestellen verwendet werden. Beim Fügen ist jedoch zu beachten, dass die Fügepartner im permanenten Kontakt zueinander stehen und dementsprechend eine moderate Anpresskraft auf die Fügestelle ausgeübt werden kann.

Mit zunehmender Dicke der zu verbindenden Bleche steigen der Aufwand und die Komplexität beim Schweißen, da mehr Energie in das umliegende Material abgeführt wird. Übliche Blechstärken für das Punktschweißen bewegen sich in dem Bereich von 0,5 mm bis 5 mm (Decker und Kabus 2018). Mit dem Punktschweißen können üblicherweise bis zu drei oder vier Bleche gleicher oder unterschiedlicher Wandstärken mit einem Schweißpunkt miteinander verbunden werden (Kimchi und Phillips 2018). Wenn mehr als zwei Bleche miteinander verbunden werden, sollte keines der außen liegenden Bleche dicker als 5 mm sein (Decker und Kabus 2018). Das Verhältnis der Wandstärken zueinander sollte nicht größer als eins zu drei sein. Abhängig von der Konstellation der Blechdicken kann der Fügeprozess jedoch herausfordernd sein, da beispielsweise die Elektrode an einem äußeren dünnen Blech dafür sorgt, dass dieses schneller abkühlt und der Schweißpunkt deshalb nicht korrekt erzeugt werden könnte. Wenn mehr als zwei Bleche miteinander gefügt werden steigt das Risiko für Verzug und auch die Anzahl an Schweißfehlern kann zunehmen. Dies trifft besonders beim Fügen von Blechen mit unterschiedlichen Dicken auf. Zusätzlich wird die Qualitätskontrolle schwieriger wenn mehrere Bleche miteinander gefügt werden.

2.5 Technologie des Widerstandspunktschweißens und des Laserstrahlschweißens

Besonders an crashbelastete Karosseriebauteile werden große strukturmechanische Anforderungen gestellt. Um hohe Festigkeiten der Fügeverbindungen zu ermöglichen und die strukturelle Integrität dieser Strukturen im Fall eines Crashes möglichst lange zu erhalten, werden hauptsächlich das Widerstandspunktschweißen und das Laserstrahlschweißen verwendet. Diese Methoden gehören in der Automobilindustrie zu den wichtigsten Fügegarten zum Verbinden von Karosseriebauteilen.

Widerstandspunktschweißen

Beim klassischen Widerstandspunktschweißen werden von zwei Seiten Elektroden an die Fügestelle zweier Bleche herangeführt (s. Abbildung 2-5). Unter der Einwirkung der Elektrodenkraft wird der Kontakt beider Bleche kreisförmig zueinander sichergestellt. Ein Stromfluss zwischen den beiden Elektroden sorgt für den Wärmeeintrag in die Fügestelle bis hin zum Erreichen der Schweißtemperatur. Durch das darauffolgende Erstarren der Schmelze sind beide Bleche punktförmig verbunden. Damit zwei

Bleche unterschiedlicher Materialien miteinander gefügt werden können, müssen sie ähnliche Schmelztemperaturen aufweisen.

Die Prozessparameter beim Widerstandspunktschweißen sind Stromstärke, Schweißzeit und Elektrodenkraft (Kimchi und Phillips 2018). Der Abstand der Schweißpunkte sollte so gewählt werden, dass der Stromfluss nicht durch die benachbarten Schweißpunkte stattfindet, da sonst die Größe des Schweißpunkts und somit seine Festigkeit beeinflusst werden kann. Es ist erstrebenswert, einen rechten Winkel zwischen der Mittelachse der Elektrode und der Normalen der Oberfläche zu erreichen, da der Winkel einen direkten Einfluss auf die Prozessparameter und die Schweißpunktqualität hat (Kimchi und Phillips 2018).

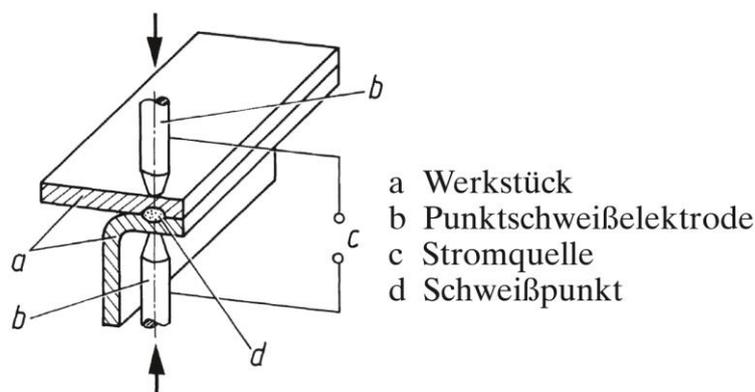


Abbildung 2-5: Zweiseitiges Punktschweißen (Decker und Kabus 2018)

Laserstrahlschweißen

Beim Fügen von Blechen mit Laserstrahlschweißen wird den Blechen mit einem Laserstrahl lokal Wärme zugeführt, sodass diese aufschmelzen und die Schmelze sich verbinden kann (s. Abbildung 2-6). Durch den hohen Energieeintrag und das schnelle Aufschmelzen ist eine hohe Prozessgeschwindigkeit möglich. Die Tiefe der Schweißnaht ist von dem Energieeintrag in den Werkstoff abhängig. Schutzgas kann verwendet werden, um die Interaktion des Sauerstoffs in der Luft mit der Schweißnaht zu verhindern (Katayama 2020). Somit kann es vor einer möglichen Oxidation der Fugestelle schützen. Zusätzlich schirmt es die Schweißnaht vor anderen Kontaminationsquellen ab.

Die am meisten in der Automobilindustrie zum Fügen von Karosseriebauteilen verwendeten Laser sind Nd:YAG-Laser und Kohlenstoffdioxidlaser (Kitani et al. 2015). Laserstrahlschweißen findet üblicherweise ohne Zusatzwerkstoff statt. Es kann jedoch auch ein Zusatzwerkstoff in Form von Draht verwendet werden. In diesem Fall wird aufgrund der Drahtzufuhr mehr Platz benötigt.

Neben geradlinigen Schweißnähten sind auch andere Formen für Schweißnähte möglich. Der Auftreffwinkel des Laserstrahls hat einen Einfluss auf die Absorption und Reflexion des Laserstrahls, wodurch die Qualität der Schweißnaht beeinflusst werden

kann (Mei et al. 2017). Die Qualität der Schweißnaht wiederum hat einen unmittelbaren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Struktur. In der Regel wird ein nahezu rechter Winkel zwischen dem Laserstrahl und der Oberfläche angestrebt.

Mei et al. haben den Einfluss des Auftreffwinkels des Laserstrahls auf die Qualität der Schweißnaht eines Überlappstoßes eines DP780 Stahls untersucht (Mei et al. 2017). Bei ihrer Untersuchung hatten beide Bleche des Überlappstoßes eine Dicke von jeweils 1,2 mm. Es wurde festgestellt, dass der Schweißprozess bis zu einem Winkel von 30° zuverlässig eine gleichmäßige gerade Schweißnaht erzeugt. Für größere Auftreffwinkel bis hin zu 40° wird die Oberfläche der Schweißnaht ungleichmäßiger und diskontinuierlicher.

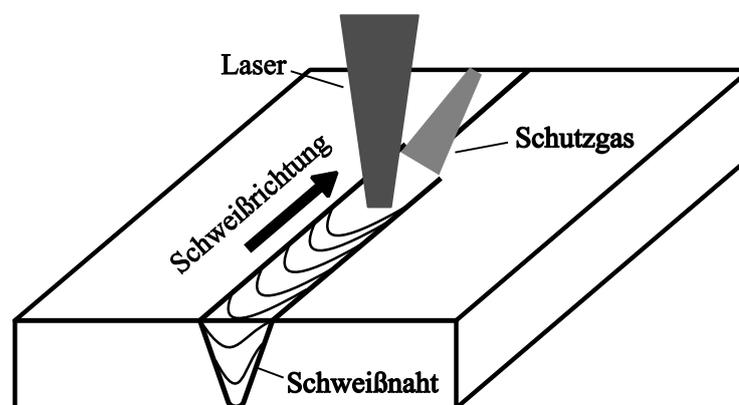


Abbildung 2-6: Schematische Darstellung des Laserstrahlschweißens (modifiziert nach (Czerwinski 2011) und (Katayama 2020))

3 Zielsetzung und Konzeption der Dissertation

In Kapitel 1.1 wurde der Stand der Forschung zur Topologieoptimierung von Profilstrukturen in Crashanwendungen und zum Einsatz der Schalenbauweise für crashbelastete Strukturen zusammengefasst. Ebenso wurden dort die im Karosseriebau wichtigsten Fügeverfahren für crashbelastete Bleche vorgestellt. Daraus ist ersichtlich, dass keine Methode existiert, mit der crashbelastete Profilstrukturen aus verbundenen Blechen sinnvoll topologisch optimiert werden können, wobei gleichzeitig die Fertigbarkeit berücksichtigt wird.

Das Ziel dieser Dissertation ist die methodische und softwaretechnische Erweiterung der GHT, um die Topologie von crashbelasteten und aus Blechen bestehenden Profilstrukturen optimieren zu können. Prinzipiell ist diese Vorgehensweise für alle Blechwerkstoffe möglich, die die Anforderungen an das Umformen und Fügen erfüllen. In erster Linie sind das die für die Automobilindustrie interessanten Stahl- und Aluminiumlegierungen.

Die Vorgehensweise zur Beschreibung von Profilen aus verbundenen Blechen mit mathematischen Graphen wird in den Kapiteln 4 und 5 vorgestellt. Dazu wird mit der Differentialbauweise aus einem oder mehreren Blechen das gesamte Profil erzeugt. Eine Erweiterung der bisherigen Profilbeschreibung ist notwendig, da bei der GHT intern geschlossene Graphen verwendet werden, die aus der Beschreibung von Strangpressprofilen stammen. Diese Graphen müssen mit Algorithmen in Profile aus verbundenen Blechen überführt werden. Damit können ähnlich komplexe Topologien wie mit dem Strangpressen realisiert werden.

Ein Aufteilen der Profilstruktur in mehrere Bleche, mit anschließendem Fügen der Baugruppe mittels Punktschweißen und Laserstrahlschweißen, ermöglicht das Verwenden einer Vielzahl an metallischen Werkstoffen, wie Aluminium- und Stahllegierungen mit mittleren bis hohen Festigkeiten. Die Fügestellen haben einen großen Einfluss auf die strukturmechanischen Eigenschaften des Blechverbunds. Deswegen ist es auch notwendig, die Fügestellen in den Optimierungsmodellen sinnvoll abzubilden. Die Modellierung von Schweißverbindungen im FE-Modell und die Berechnung der dazugehörigen Festigkeiten, in Abhängigkeit von den Blechdicken der Fügeverbindung, werden in Kapitel 6 vorgestellt. Die Fügeverbindungen werden mit eindimensionalen Balkenelementen mit Versagenskriterium dargestellt und bilden das Punktschweißen und Laserstrahlschweißen ab.

Die Komplexität der einzelnen Bleche eines Profils kann variieren, es sollen jedoch nur Strukturvorschläge verwendet werden, die auch gefertigt werden können. Dazu ist es notwendig, Fertigungsrestriktionen speziell für die Blechbauweise zu implementieren (s. Kapitel 7). Zum einen sind das Fertigungsrestriktionen, die beim Umformen der

Bleche von Bedeutung sind. Zum anderen müssen Fertigungsrestriktionen beim Fügen der einzelnen Bleche berücksichtigt werden. Diese hängen vom jeweiligen Umform- und Fügeverfahren ab. Als Umformverfahren für die einzelnen Bleche wird das Schwenkbiegen verwendet. Da es sich um crashrelevante Profilstrukturen für Fahrzeugkarosserien handelt, liegt der Fokus beim Fügen auf dem Widerstandspunkt- und Laserstrahlschweißen, weil diese Methoden auch in der Automobilindustrie erfolgreich eingesetzt werden. Die Fertigbarkeit der Teilbleche wird mit einer Kollisionsüberprüfung zwischen dem Graphen der Bleche und dem Umformwerkzeug überprüft (s. Abschnitt 7.3).

Die Fügbarkeit von Blechen wird mit einer Kollisionsüberprüfung zwischen dem Bauraum des Fügewerkzeugs und der Profilstruktur geprüft (s. Abschnitt 7.4). Die Größe und die notwendige Zugänglichkeit der Fügewerkzeuge sind von dem Fügeverfahren abhängig.

Damit die einzelnen Bleche miteinander zu einem Profil gefügt werden können, muss die Fügereihenfolge bestimmt werden. Dazu werden alle möglichen Fügereihenfolgen auf ihre Fügbarkeit überprüft, bis eine valide Reihenfolge gefunden wurde oder der Entwurf als nicht ffügbar deklariert wird (s. Abschnitt 7.5).

In Kapitel 8 werden zum einen Heuristiken vorgestellt, die universell einsetzbar sind, zum anderen solche, die speziell für die Blechbauweise entwickelt wurden. Die Heuristiken beider Gruppen verändern die Topologie so, dass sowohl die strukturmechanischen Eigenschaften als auch die Fügbarkeit der in der Optimierung erzeugten Entwürfe verbessert werden. Dadurch wird es ermöglicht, dass im Optimierungsprozess auch komplexere Topologien mit guten strukturmechanischen Eigenschaften erzeugt werden, bei denen die Fügstellen im Zusammenbau erreichbar sind.

Der Optimierungsablauf der GHT für Profilstrukturen aus verbundenen Blechen wird im Kapitel 9 dargestellt. Dies beinhaltet eine neue Dimensionierungsstrategie für Profile aus verbundenen Blechen (s. Abschnitt 9.2). In dieser Dimensionierungsstrategie wird jedem Blech der Profilstruktur eine Entwurfsvariable zugewiesen. Damit kann bei einer Dimensionierung mit einer moderaten Anzahl an Funktionsaufrufen eine sehr gute Designfreiheit der Profilstruktur erzielt werden.

Der Ablauf der GHT in Kombination mit den Fertigungsrestriktionen für Blechverbunde schränkt den Entwurfsraum durch das iterative Einbringen von einzelnen Wänden und das dadurch verbundene Aussortieren vermeintlicher nicht fertiger Entwürfe stark ein. Aus diesem Grund wird eine Optimierungsstrategie entwickelt, die potenziell vielversprechende Entwürfe detektiert und diese trotz Verletzung der Fertigungsrestriktionen zunächst verwendet (s. Abschnitt 9.3). Diese Entwürfe müssen

dann durch die topologische Modifikation einer Heuristik in der nächsten Iteration fertigbar werden, ansonsten werden diese verworfen und nicht weiter verfolgt.

Die in dieser Arbeit adressierten wissenschaftlichen Fragestellungen lauten wie folgt:

- Wie können die in der GHT verwendeten Graphen, die in der GHT-Basisversion Strangpressprofile abbilden, mit Algorithmen so verändert werden, dass sie Profilstrukturen aus zusammengesetzten Blechen abbilden?
- Kann die Verwendung von Fertigungsrestriktionen dafür sorgen, dass das Umformen und das Fügen der Bleche zu einer Profilstruktur möglich ist?
- Wie kann in einer Optimierungsstrategie die Fügbarkeit von Profilen aus verbundenen Blechen durch das iterative Einbringen von Topologieänderungen berücksichtigt werden?
- Können in Anwendungsbeispielen mit der GHT Entwürfe aus Blechen gefunden werden, die bei der Erfüllung der Ziele und Restriktionen mit Strangpressprofilen vergleichbar oder sogar besser sind?
- Wie könnte eine Dimensionierungsstrategie für Profilstrukturen aus verbundenen Blechen umgesetzt werden?

4 Mathematische Graphen in der Topologieoptimierung

4.1 Geometriebeschreibung

Bei der GHT werden mathematische Graphen (weiterhin nur Graphen genannt) verwendet, um die Geometrie von Profilstrukturen zu beschreiben (Ortmann 2015). Ein Graph beschreibt durch *Vertices* (Knoten) und *Edges* (Kanten) den Querschnitt eines Extrusionsprofils. Der Querschnitt kann entlang eines benutzerdefinierten Splines extrudiert und in ein FE-Modell überführt werden. Jedem Vertex werden Koordinaten zugewiesen. Die Vertices können über Edges miteinander verbunden werden, wobei jede Edge eine Wand im Extrusionsprofil repräsentiert. Jede Edge hat einen Start- und einen Endvertex, wodurch ihre Richtung vorgegeben wird. Es wird zwischen äußeren und inneren Edges unterschieden. Die Bezeichnung *äußere Edges* bezieht sich auf alle Edges, die sich auf der äußeren Kontur des Graphen befinden. Analog dazu werden alle Edges, die sich nicht auf der äußeren Kontur befinden, als *innere Edges* bezeichnet.

Dem Graphen können weitere Eigenschaften hinzugefügt werden, beispielsweise Wanddicken der Edges, die Extrusionslänge des Profils oder auch die Definition von Triggerelementen (Sperber 2022) und Faservolumenanteilen von Faserverbundstrukturen (Schneider 2023). In Abbildung 4-1 (oben) ist die Syntax eines quadratischen Profils mit einer X-förmigen inneren Struktur dargestellt. Als Dezimaltrennzeichen wird in der Syntax ein Punkt verwendet. Der Vertex mit dem Argument *Parameter* enthält allgemeine Informationen wie den Namen des Graphen, die Länge des Profils in Extrusionsrichtung und die Dichte des verwendeten Materials, die für die interne Massenberechnung verwendet wird. Die Vertices mit der Bezeichnung *LINK* definieren die Koordinaten der Knoten. Sowohl die Vertices als auch die Edges sind über Identifikationsnummern eindeutig identifizierbar. Jede Edge stellt eine Kante im Graphen dar, die zwischen den dazugehörigen Vertices verläuft. Über den Parameter *CURVATURE* kann eine Krümmung der dazugehörigen Edge angegeben werden und der Parameter *THICKNESS* gibt die Wandstärke der Edge an. In Abbildung 4-1 (unten) ist ein Graph visualisiert und das dazugehörigen FE-Modell dargestellt.

Durch das Verändern der Koordinaten der Vertices ermöglicht es ein Graph, effizient und algorithmierbar Änderungen an der Geometrie vorzunehmen. Dies beinhaltet nicht nur Änderungen an der Form, es können auch Edges aufgeteilt werden und neue Edges sowie Vertices eingefügt werden, wodurch die Topologie des Graphen geändert wird.

Außerdem können beliebige Checks am Graphen durchgeführt werden, wodurch beispielsweise Fertigungsrestriktionen überprüft werden können (s. Kapitel 6).

```

VERTEX, LINK, 1, COORDINATES(-100.0, 100.0)
VERTEX, LINK, 2, COORDINATES(100.0, 100.0)
VERTEX, LINK, 3, COORDINATES(100.0, -100.0)
VERTEX, LINK, 4, COORDINATES(-100.0, -100.0)
VERTEX, LINK, 5, COORDINATES(0.0, 0.0)
VERTEX, PARAMETER, 6, NAME(Graph), LENGTH(150.0), DENSITY(7.85E-6)
EDGE, 1, VERTICES(3, 4), CURVATURE(0.0), THICKNESS(2.0)
EDGE, 2, VERTICES(1, 4), CURVATURE(0.0), THICKNESS(2.0)
EDGE, 3, VERTICES(1, 2), CURVATURE(0.0), THICKNESS(2.0)
EDGE, 4, VERTICES(2, 3), CURVATURE(0.0), THICKNESS(2.0)
EDGE, 5, VERTICES(4, 5), CURVATURE(0.0), THICKNESS(2.0)
EDGE, 6, VERTICES(5, 2), CURVATURE(0.0), THICKNESS(2.0)
EDGE, 7, VERTICES(1, 5), CURVATURE(0.0), THICKNESS(2.0)
EDGE, 8, VERTICES(5, 3), CURVATURE(0.0), THICKNESS(2.0)

```

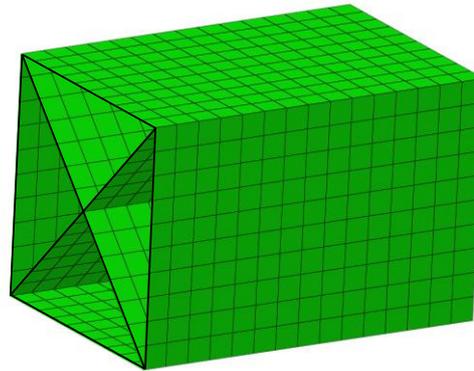
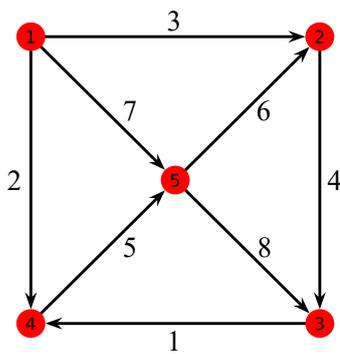


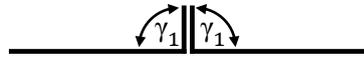
Abbildung 4-1: Syntax (oben) mit dazugehörigem Graph (links) und Finite-Elemente-Modell mit einer Extrusionslänge von 150 mm (rechts)

4.2 Customflange-Syntax

Die bisherige Graphenbeschreibung der GHT wurde im Hinblick auf die Verwendung von Strangpressprofilen entwickelt. Damit Profile aus verbundenen Blechen abgebildet werden können, müssen Erweiterungen an der Graphensyntax vorgenommen werden. Die Einbringung von benutzerdefinierten Flanschen (im Folgenden *Customflange* genannt) ermöglicht es dem Benutzer, nach außen gerichtete Flansche auf den äußeren Edges zu erzeugen. Diese nach außen gerichteten Flansche werden genutzt, um die äußere Struktur in mehrere Schalen aufzuteilen. Ein solcher Flansch kann verwendet werden, indem an eine Edge das Argument `CUSTOMFLANGE(<Double>)` angehängt wird. `<Double>` steht für die Formatierung der Eingabe als Fließkommazahl. Der Winkel zwischen dem Flansch und den angrenzenden Edges wird symmetrisch erzeugt

(s. Abbildung 4-2). Die Überlappungslänge des Flansches und der Fügeseit werden in der Konfigurationsdatei angegeben.

Benachbarte Edges parallel



Benachbarte Edges nicht parallel

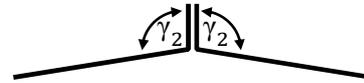


Abbildung 4-2: Ausprägung des Customflange in Abhängigkeit von benachbarten Edges

Customflange an einer fixen Position

Die Positionierung eines Customflange kann von einem Benutzer an einer relativen Stelle auf einer Edge fest vorgegeben werden. Erlaubte Werte für diese sogenannten fixen Customflanges sind zwischen 0 und 1,0, wobei 0 der Position des Startvertex und 1,0 der Position des Endvertex der Edge entspricht. Die Werte zwischen dem Start- und dem Endpunkt werden auf der Edge linear interpoliert. Abbildung 4-3 zeigt den Ausgangsgraph und den daraus resultierenden Blechgraph.

Der Benutzer muss bei der Erstellung eines Graphen sicherstellen, dass sich fixe Customflanges nicht zu nah an anderen Vertices befinden und deswegen nicht erzeugt werden können. In einer GHT-Optimierung wird bei der Einbringung neuer Wände in die Struktur überprüft, ob die neue Wand einen Mindestabstand zu dem fixen Customflange einhält.

Folgend ist die Syntax der beiden Edges mit Customflanges dargestellt:

```
EDGE, 1, VERTICES(1, 2), CURVATURE(0.0), THICKNESS(3.0), OUTER, CUSTOMFLANGE(0.75)
EDGE, 3, VERTICES(3, 4), CURVATURE(0.0), THICKNESS(3.0), OUTER, CUSTOMFLANGE(0.25)
```

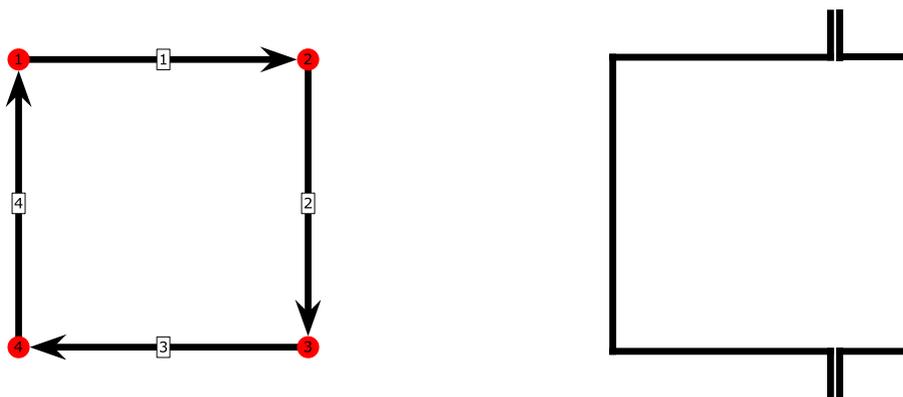


Abbildung 4-3: Graph vor (links) und nach (rechts) der Ableitung zur Blechstruktur mit unsymmetrischem fixem Customflange (rechts)

Variabler Customflange

Wenn es die Designfreiheit ermöglicht, können ganze Edges ausgewählt werden, auf denen ein äußerer Flansch sinnvoll von einem Algorithmus positioniert werden soll. Die automatische Positionierung der äußeren Flansche kann dann sinnvoll sein, wenn

innere Edges mit in den äußeren Flansch integriert werden können und sich dadurch die Anzahl der Fügstellen reduziert sowie die Fügbarkeit der Struktur verbessert (s. Abbildung 4-4). Ein variabler Customflange kann auf einer Edge mit dem Argument `CUSTOMFLANGE(2.0)` positioniert werden.

Folgend ist die Syntax der Edges mit Customflanges dargestellt:

```
EDGE, 1, VERTICES(1, 7), CURVATURE(0.0), THICKNESS(3.0), OUTER, CUSTOMFLANGE(2.0)
EDGE, 3, VERTICES(3, 5), CURVATURE(0.0), THICKNESS(3.0), OUTER, CUSTOMFLANGE(2.0)
EDGE, 5, VERTICES(5, 4), CURVATURE(0.0), THICKNESS(3.0), OUTER, CUSTOMFLANGE(2.0)
EDGE, 7, VERTICES(7, 2), CURVATURE(0.0), THICKNESS(3.0), OUTER, CUSTOMFLANGE(2.0)
```

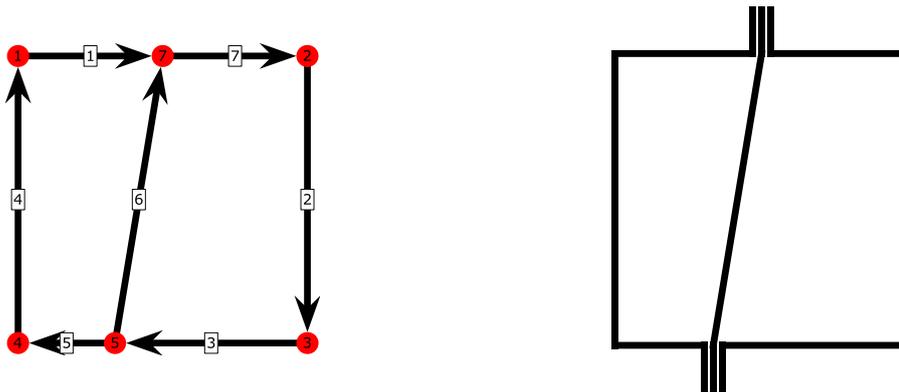


Abbildung 4-4: Graph vor (links) und nach (rechts) der Ableitung zur Blechstruktur mit einer inneren Edge und variablem Customflange

Wenn keine innere Edge an eine Edge mit einem variablen Customflange angrenzt, wird der äußere Flansch mittig ausgeprägt (s. Abbildung 4-5). Beim Aufteilen einer Edge mit einem Customflange werden die Argumente für den Customflange für beide neuen Edges aktualisiert.

Folgend ist die Syntax der beiden Edges mit Customflanges angegeben:

```
EDGE, 1, VERTICES(1, 2), CURVATURE(0.0), THICKNESS(3.0), OUTER, CUSTOMFLANGE(2.0)
EDGE, 3, VERTICES(3, 4), CURVATURE(0.0), THICKNESS(3.0), OUTER, CUSTOMFLANGE(2.0)
```

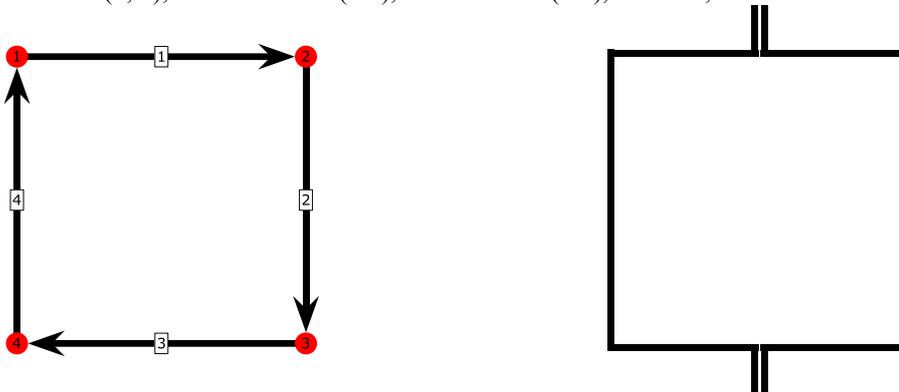


Abbildung 4-5: Graph vor (links) und nach (rechts) der Ableitung zur Blechstruktur mit variablem Customflange und ohne innere Edge

4.3 Dijkstra-Algorithmus zur Bestimmung von Pfaden

Der Dijkstra-Algorithmus wird zum Finden von kürzesten Pfaden zwischen Vertices eines gewichteten Graphen verwendet. Benannt ist der Algorithmus nach seinem Erfinder Edsger W. Dijkstra (Dijkstra 1959). Als gewichteter Graph wird ein Graph bezeichnet, dessen Edges ein numerischer Wert zugewiesen ist. Die gewichteten Edges repräsentieren beispielsweise die Entfernung zwischen zwei Vertices. Eingesetzt wird der Algorithmus zum Beispiel in Routenplanern und er berechnet die kürzesten Strecken zwischen Start- und Endpunkten. In dieser Arbeit wird der Algorithmus zur Layoutfindung verwendet und bestimmt dort den kürzesten Pfad zwischen zwei Vertices.

In dem Ablauf des Dijkstra-Algorithmus werden zunächst alle Vertices in eine Liste mit unbesuchten Vertices hinzugefügt. Sobald ein Vertex besucht wurde, wird er von der Liste der unbesuchten Vertices entfernt. Jedem Vertex wird eine vorläufige Entfernung zum Startvertex zugewiesen, die beim Durchlaufen des Algorithmus iterativ angepasst wird. Die vorläufige Entfernung entspricht der bis zum jetzigen Fortschritt des Algorithmus kürzesten Entfernung zum Startvertex. Zu Beginn wird jedem Vertex außer dem Startvertex unendlich als Wert für die vorläufige Entfernung zugewiesen. Für den Startvertex wird die vorläufige Entfernung auf null gesetzt.

In jeder Iteration wählt der Algorithmus zunächst den Vertex aus der Liste der unbesuchten Vertices mit der kleinsten vorläufigen Entfernung zum Startvertex aus. Ausgehend von diesem Vertex wird für alle angrenzenden Vertices der Wert für die vorläufigen Entfernungen neu berechnet. Dazu wird die vorläufige Entfernung des aktuellen Vertices mit der Gewichtung der Edge zum Nachbarn (hier die Entfernung zwischen den beiden Vertices) addiert. Wenn dieser neu berechnete Wert kleiner ist als die dem Nachbarn aktuell zugewiesene vorläufige Entfernung, wird dieser Wert der vorläufigen Entfernung des Nachbarn zugewiesen. Zusätzlich wird die Bezeichnung des Vorgängervertex abgespeichert, damit später der kürzeste Pfad zu diesem Vertex bekannt ist und rekonstruiert werden kann. Nachdem dies für alle Nachbarn geschehen ist, beginnt die nächste Iteration.

Diese Schleife wird solange wiederholt, bis alle Vertices besucht wurden und somit die Liste der unbesuchten Vertices leer ist. Dann entsprechen die vorläufigen Entfernungen der Vertices den kürzesten Entfernungen zwischen ihnen und dem Startvertex. Nun kann jeder beliebige Vertex als Endvertex definiert werden, wodurch unmittelbar die kürzeste Entfernung zum Startvertex und der dazugehörige Pfad bekannt sind. Dieser Pfad kann ausgehend von dem Endvertex ermittelt werden, da jedem Vertex der Vorgängervertex mit der kürzesten Entfernung zum Startvertex bekannt ist.

Der Dijkstra-Algorithmus findet die kürzeste Entfernung zwischen zwei Vertices nur für positive Gewichtungen von Edges. Die Arbeitsweise des Algorithmus kann unmittelbar auf die Graphen der GHT angewendet werden, da sowohl die Vertices als auch deren Verbindungen über Edges und die dazugehörigen Gewichtungen der Edges bekannt sind.

Abbildung 4-6 veranschaulicht die Vorgehensweise des Algorithmus an einem Beispiel in einer Abfolge von fünf Iterationen (a bis e). Der dargestellte Zeitpunkt ist jeweils zu Beginn der Iteration. Der verwendete Graph besteht aus fünf Vertices mit den Bezeichnungen s, t, x, y und z. Unbesuchte Vertices werden zu Beginn weiß markiert, sobald ein Vertex besucht wurde, wird er schwarz eingefärbt. Als Startbedingung für den Algorithmus wird der Startvertex s verwendet. Die vorläufige Entfernung zum Startvertex steht in jedem Vertex.

Iteration (a)

Der aktuelle Vertex dieser Iteration ist der Startvertex s (grau markiert), da er in der Liste der unbesuchten Vertices die geringste vorläufige Entfernung zum Startvertex hat. Die benachbarten Vertices von s sind t und y. Für diese beiden Vertices ergeben sich auf Basis der vorläufigen Entfernung des Vertex s und der Gewichtung der Edges die vorläufigen Entfernungen der Vertices für Vertex t (10) und für Vertex y (5). Da diese Entfernungen kleiner sind als die bisherigen vorläufigen Entfernungen, werden sie als neue vorläufige Entfernungen gesetzt.

Iteration (b)

Vertex s wird als besucht markiert und aus der Liste der unbesuchten Vertices entfernt. Die grau schattierten Edges zeigen den bislang kürzesten Pfad zu den bereits besuchten Vertices an. Der aktuelle Vertex dieser Iteration ist y. Die benachbarten Vertices sind t, x und z. Für alle drei Vertices kann eine kleinere vorläufige Entfernung gefunden werden. Die vorläufige Entfernung von Vertex t, die in der letzten Iteration bereits verbessert wurde, kann erneut verbessert werden.

Die Iterationen (c) bis (e) laufen analog zu dem bisherigen Vorgehen ab. Nach der Beendigung des Algorithmus sind die kürzesten Entfernungen vom Startvertex zu allen anderen Vertices bekannt. Die kürzeste Entfernung zum Vertex x beträgt beispielsweise 9. Der dazugehörige kürzeste Pfad besteht aus den Vertices s, y, t und x.

Die mit dem Dijkstra-Algorithmus ermittelten Pfade können nun bei der Aufteilung der Profilstruktur in mehrere miteinander gefügte Bleche verwendet werden (wird in Abschnitt 5.3 und 5.4 erläutert).

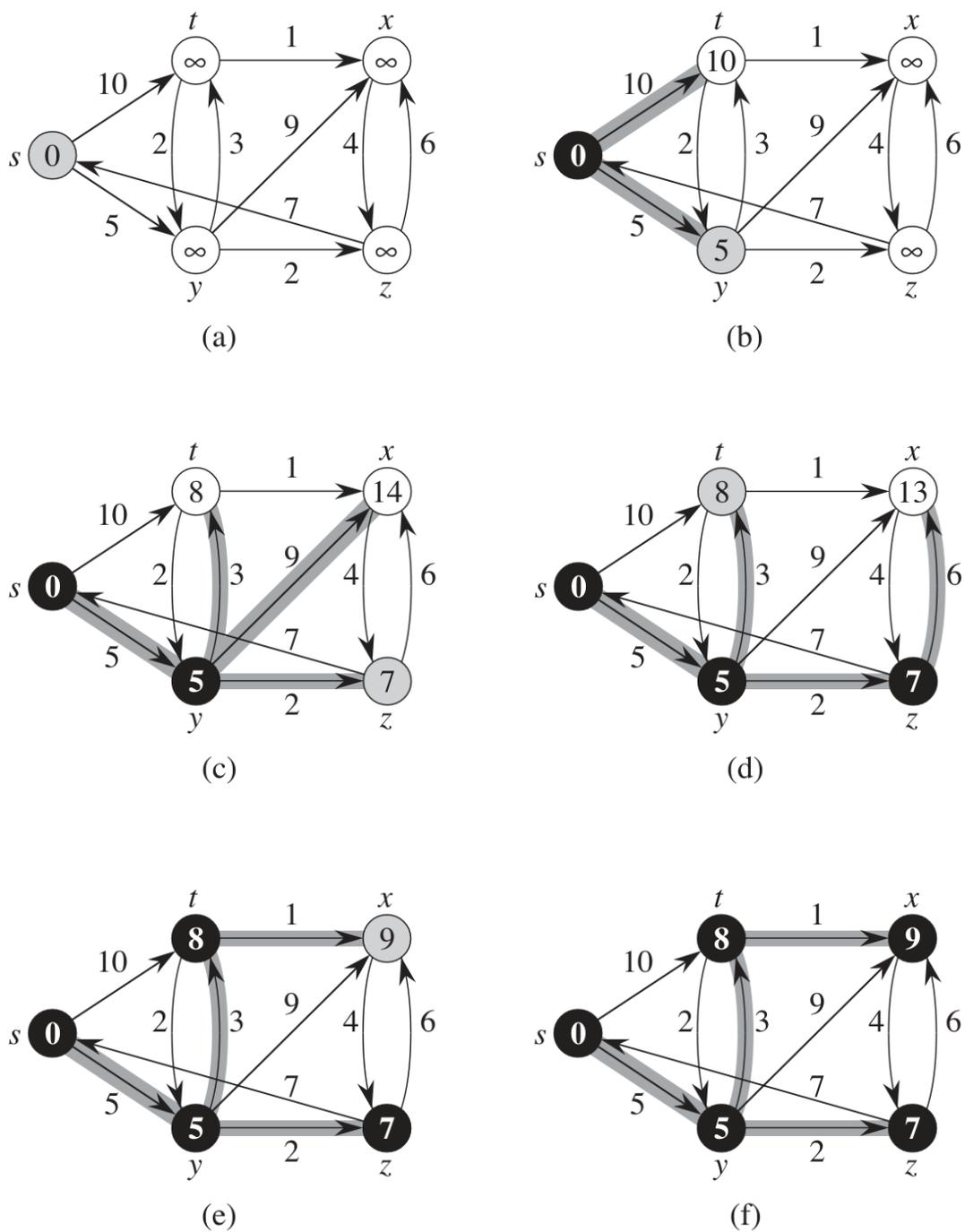


Abbildung 4-6: Ablauf des Dijkstra-Algorithmus für ein Beispiel mit fünf Vertices (modifiziert nach Cormen et al. 2009)

5 Vom mathematischen Graphen zur Beschreibung von Profilen aus verbundenen Blechen

5.1 Prinzipieller Ablauf

Bei der GHT werden im Optimierungsablauf geschlossene Graphen verwendet, die ihren Ursprung in der Beschreibung von Strangpressprofilen haben. Um Profile aus zusammengesetzten Blechstrukturen im Optimierungsablauf der GHT verwenden zu können, werden die geschlossenen Graphen mit Algorithmen in Graphen überführt, die aus mehreren Blechen bestehen. Letztere Graphen können dann im Optimierungsablauf der GHT verwendet werden. Ein erster Ansatz zum Beschreiben von Profilen aus verbundenen Blechen wurde von Link et al. (2019) vorgestellt. Die dort verwendete Anordnung von Blechen und Flanschen wurde weiterentwickelt.

Den finalen Prozessablauf, bei dem ein geschlossenes Profil in ein aus Blechen herstellbares Profil überführt wird, zeigt Abbildung 5-1.

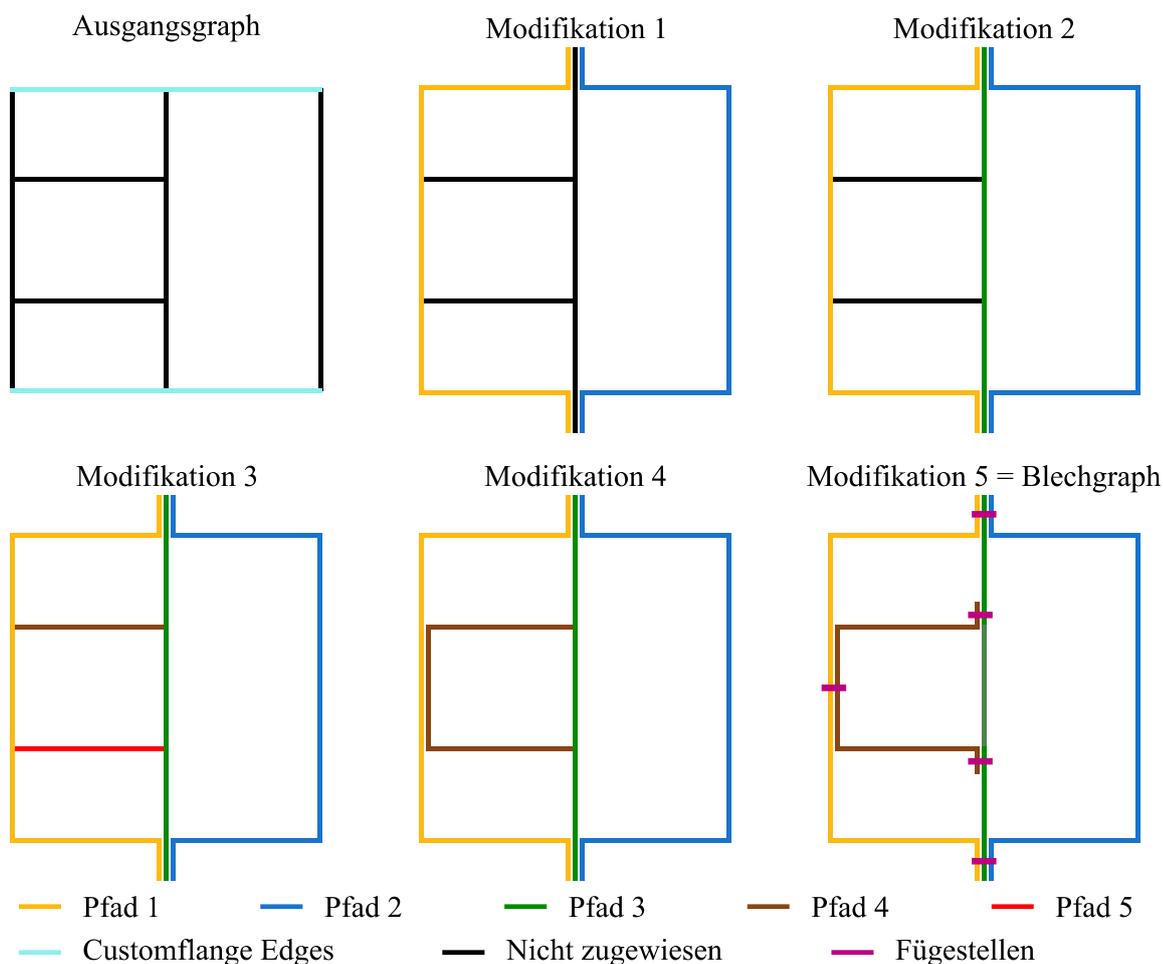


Abbildung 5-1: Beispiel vertikale Wand mit Hutprofil – Graphmodifikation von einem geschlossenen zu einem aus mehreren Blechen bestehenden Graphen

In Abbildung 5-2 ist der Prozess für eine weitere Profilstruktur mit einem inneren Trapezprofil dargestellt. Die Bezeichnung Ausgangsgraph steht für den Graphen des geschlossenen Profils und der Terminus Modifikation 5 (im Folgenden auch Blechgraph genannt) für die resultierende, aus Blechen zusammengesetzte Profilstruktur. Der Blechgraph hat die gleiche Topologie und Form wie der Ausgangsgraph. Die Vertices sind zur besseren Darstellung ausgeblendet. Jeder Pfad im Graphen repräsentiert ein einzelnes Blech. In Abbildung 5-3 ist der dazugehörige Prozessablauf dargestellt, mit dem die einzelnen Modifikationen sequenziell durchgeführt werden. Diese Modifikationen werden in Abschnitt 5.2 bis Abschnitt 5.6 vorgestellt.

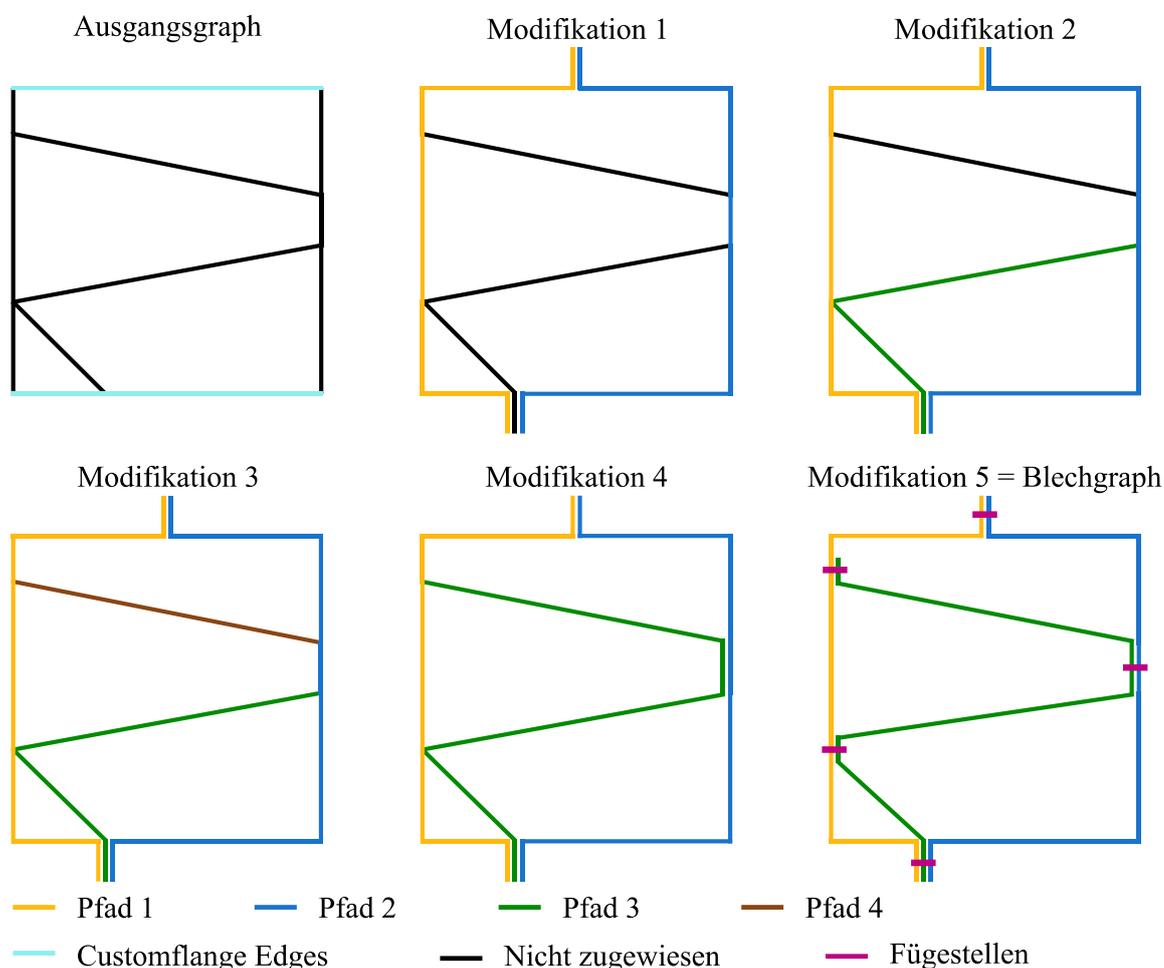


Abbildung 5-2: Beispiel Trapezprofil – Graphmodifikation von einem geschlossenen zu einem aus mehreren Blechen bestehenden Graphen

In der vorliegenden Arbeit werden keine Radien zwischen den einzelnen Schenkeln eines Blechs berücksichtigt. Eine Erweiterung ist jedoch mit moderatem Aufwand möglich. Die Überführung des geschlossenen Graphen in ein aus Blechen herstellbares Profil wird in fünf Schritte unterteilt:

- Modifikation 1: Erzeugen der äußeren Flansche an Customflanges und Erzeugen der äußeren Schalen

- Modifikation 2: Erzeugen von Pfaden von inneren Edges an den Customflanges
- Modifikation 3: Erzeugen von Pfaden für alle verbleibenden inneren Edges
- Modifikation 4: Verbinden von Pfaden
- Modifikation 5: Erzeugen von Flanschen und Fügeverbindungen

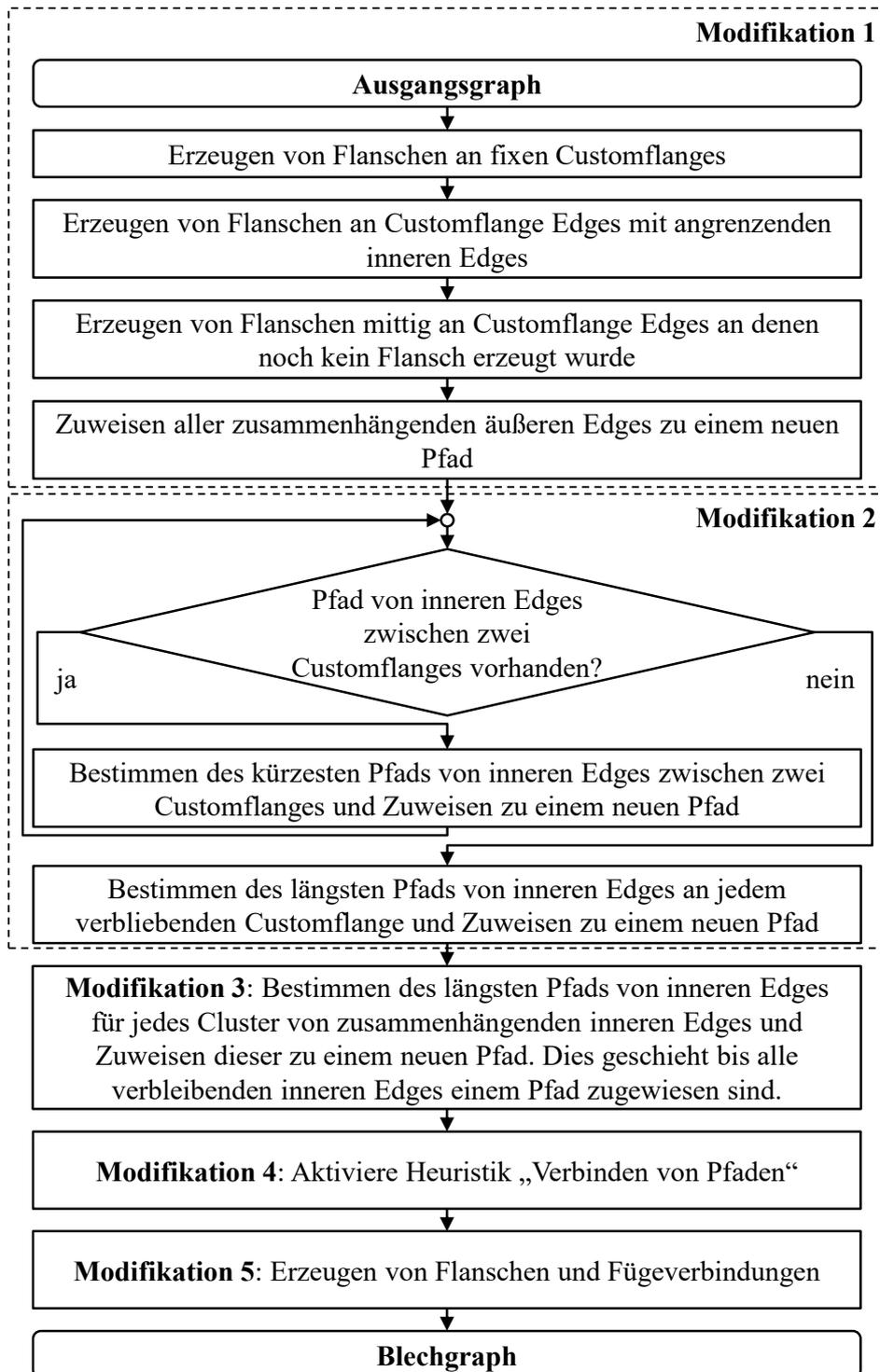


Abbildung 5-3: Ablaufdiagramm zum Überführen eines Ausgangsgraphen in einen Blechgraphen

5.2 Modifikation 1: Erzeugen der äußeren Flansche an Customflanges und Erzeugen der äußeren Schalen

Zunächst werden alle Customflange-Edges des Ausgangsgraphen bestimmt, die der Benutzer definiert hat (s. Abbildung 5-4). Für diejenigen Edges, die einen fixen Customflange enthalten, also einen fixen nach außen gerichteten Flansch, wird der Customflange an der festgelegten Position erzeugt (s. Abschnitt 4.2). Die Überlappungslänge der Flansche und der Fügspalt werden in der Konfigurationsdatei festgelegt. An den nach Customflanges kann das Profil mit den angrenzenden Karosseriekomponenten verbunden werden. Im nächsten Schritt wird an allen weiteren Edges mit einem variablen Customflange überprüft, ob sie an eine innere Edge angrenzen. Wenn dies der Fall ist, wird an diesen Positionen ein Customflange erzeugt, der die innere Edge miteinbezieht. In dem Beispiel in Abbildung 5-4 sind die oberen und unteren Edges als Customflange Edges markiert. Folglich wird an beiden oberen und unteren Edges ein Customflange erzeugt, der die inneren Edges einbezieht. Wenn an eine Customflange-Edge keine innere Edge angrenzt, wird der Customflange mittig ausgeprägt. Dieser Fall tritt in diesem Beispiel nicht auf. Ebenso ist für dieses Beispiel kein fixer Customflange definiert.

Durch das Einbringen von Flanschen in die äußere Kontur des Graphen ist dieser nicht mehr geschlossen. Im nächsten Schritt werden alle zusammenhängenden äußeren Edges einem eigenen Pfad zugewiesen, wodurch Pfad 1 und Pfad 2 entstehen. Jeder Pfad repräsentiert ein einzelnes Blech.

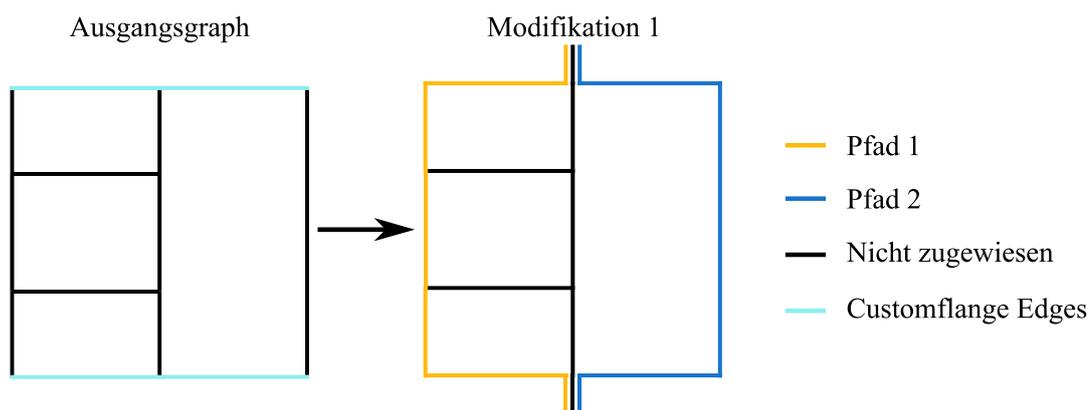


Abbildung 5-4: Graphmodifikation 1 – Erzeugen von äußeren Flanschen und Aufteilen der äußeren Struktur in Pfade, die Bleche repräsentieren

5.3 Modifikation 2: Erzeugen von Pfaden von inneren *Edges an den Customflanges*

Die äußeren Edges des Graphen wurden bereits im vorherigen Schritt in mehrere Pfade aufgeteilt. In den nächsten Schritten werden die inneren Edges ebenfalls in einzelne Pfade unterteilt. Dieser Schritt findet nur für Customflanges statt, an denen mindestens eine innere Edge angrenzt. Ausgehend von allen Customflanges wird der kürzeste Pfad von inneren Edges zu anderen Customflanges mit dem Dijkstra-Algorithmus gesucht (s. Abschnitt 4.3). Dies findet so lange statt, bis keine Pfade mehr zwischen Customflanges gefunden werden. Die inneren Edges jedes gefundenen Pfads werden aus der Liste mit möglichen Edges zur Pfadfindung entfernt, damit sie nicht mehrfach verwendet werden. Jeder gefundene Pfad repräsentiert auch hier ein Blech. In dem Beispiel in Abbildung 5-5 gibt es zwei Customflanges, zwischen denen ein Pfad gefunden werden kann (Pfad 3). Die Verwendung des kürzesten Pfads zwischen den Customflanges sorgt dafür, dass die verbleibenden inneren Edges im nächsten Schritt sinnvoll an eine möglichst gerade und einfache Struktur angeflanscht werden können. Der prinzipielle Wunsch, möglichst lange Pfade zu generieren, um die Gesamtanzahl von Blechen und so auch die Anzahl von Fügstellen zu reduzieren, ist deshalb zweitrangig, da die globale Fügbarkeit der Struktur im Vordergrund steht.

Wenn an einem Customflange kein Pfad zu einem anderen Customflange gefunden werden kann, werden an diesem Customflange zunächst die kürzesten Pfade zu allen Vertices der inneren Edges mit dem Dijkstra-Algorithmus bestimmt. Aus diesen Pfaden wird dann der längste Pfad ausgewählt und erzeugt. Es wird der längste Pfad gewählt, weil eine Verbindung zu einem anderen Customflange nicht möglich ist, dementsprechend sollen möglichst viele Edges in einen Pfad integriert werden, um die Anzahl an Pfaden und Fügstellen zu reduzieren. Wenn eine einzelne Edge einem leeren Pfad zugewiesen wird, entstehen dadurch zwei neue Fügstellen. Kann diese Edge einem bereits existierenden Pfad hinzugefügt werden, erhöht sich die Anzahl der Fügstellen des Pfads nur um eins. Dementsprechend sind lange Pfade wünschenswert, solange sie fertigbar sind und die Gesamtstruktur fügbar ist (s. Abschnitt 7.4 und 7.5). Die Vorgehensweise zur Erzeugung des längsten Pfads an einem Customflange ist an der Profilstruktur mit einem inneren Trapezprofil in Abbildung 5-2 dargestellt. Es ist von Bedeutung, dass es keine Überschneidungen des Pfads mit sich selbst und auch mit den bereits gefundenen Pfaden gibt.

Es wird bewusst der Dijkstra-Algorithmus verwendet und akzeptiert, dass gegebenenfalls nicht immer der längste Pfad für beliebige Graphenquerschnitte gefunden wird, da Algorithmen, die die Problematik der längsten Pfade lösen, längere

Berechnungszeiten haben und die Aufgabe nicht in der sogenannten Polynomialzeit lösen können (Karger et al. 1997). Ein Algorithmus läuft in Polynomialzeit wenn seine Laufzeit über die Anzahl der Eingabewerte n begrenzt ist und als n^k dargestellt werden kann, wobei k eine Konstante ist, die nicht von n abhängt. Für das Beispiel des Dijkstra-Algorithmus setzt sich n aus der Anzahl der Edges und Vertices im Graphen zusammen. Im Hinblick darauf, dass in einer Optimierung mit der GHT bis zu mehrere Tausend Graphen auf ihre längsten Pfade untersucht werden können, die auch noch mehr Edges als das hier gezeigte Beispiel haben können, muss ein Algorithmus verwendet werden, der sich durch eine kurze Berechnungszeit auszeichnet. Die Laufzeit für das Ableiten des Entwurfs aus Abbildung 5-1 in eine Blechstruktur beträgt durchschnittlich 0,01 Sekunden.

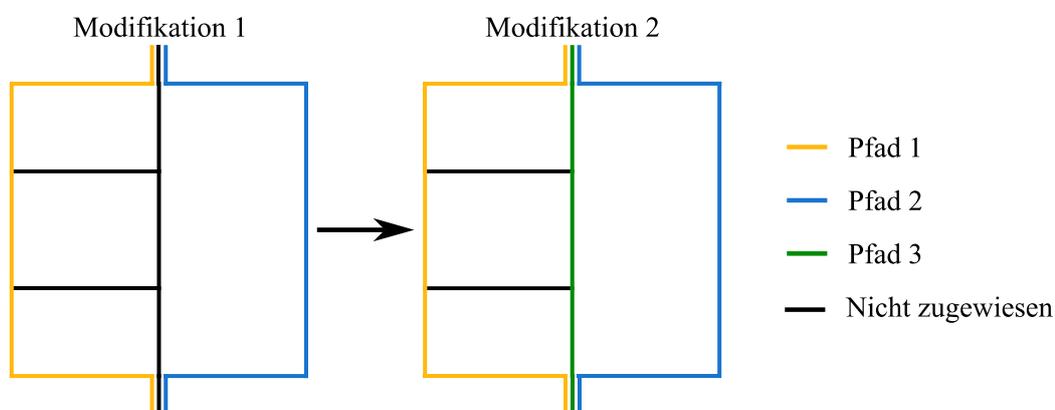


Abbildung 5-5: Graphmodifikation 2 – Erzeugen von Pfaden von inneren Edges an den Customflanges

5.4 Modifikation 3: Erzeugen von Pfaden für alle verbleibenden inneren *Edges*

Beim Erzeugen von Pfaden aus den inneren Edges wird darauf geachtet, dass keine Überschneidungen mit den bereits erzeugten Pfaden stattfinden. Damit keine Edges mehrfach verwendet werden, werden die Edges der bereits erzeugten Pfade aus der Liste der inneren Edges entfernt. Es ist jedoch möglich, dass sich Edges aus dieser Liste einen Vertex mit einer Edge der bereits erzeugten Pfade teilen. Dadurch kann dieser Vertex als Kreuzungspunkt von zwei Pfaden dienen und Überschneidungen erzeugen (s. Abbildung 5-6 links). Um dies zu verhindern, werden zunächst Cluster aus zusammenhängenden inneren Edges gebildet, die keine der bereits erzeugten Pfade kreuzen. Dazu wird eine beliebige innere Edge als Start verwendet, die noch keinem Pfad zugewiesen ist. Ausgehend von dieser Edge wird über die benachbarten Edges iteriert und die gefundenen Edges werden einem Cluster hinzugefügt, sofern dadurch nicht ein bereits erzeugter Pfad gekreuzt wird. Dies geschieht, bis alle zum Cluster

gehörenden Edges bestimmt sind. Wenn sich in der Liste mit inneren Edges noch weitere Edges befinden, die keinem Cluster angehören, beginnt der Prozess zum Finden des nächsten Clusters mit einer dieser Edges erneut. Dies geschieht, bis alle inneren Edges auf Cluster aufgeteilt sind.

Für jeden Cluster wird iterativ der längste der kürzesten Pfade mit dem Dijkstra-Algorithmus (s. Abschnitt 4.3) bestimmt und einem neuen Pfad zugewiesen. Die Edges des neuen Pfads werden aus dem Cluster gelöscht und die Schleife wird wiederholt, bis sich keine Edge mehr in dem Cluster befindet. Das Beispiel in Abbildung 5-7 hat zwei Cluster mit jeweils einer inneren Edge, die Pfad 4 und Pfad 5 zugewiesen werden.

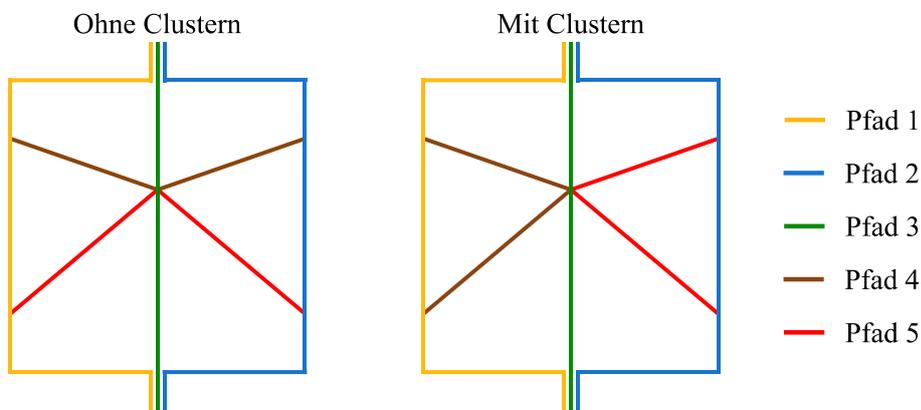


Abbildung 5-6: Bestimmung von Pfaden von inneren Edges ohne (links) und mit (rechts) Clustern von Edges

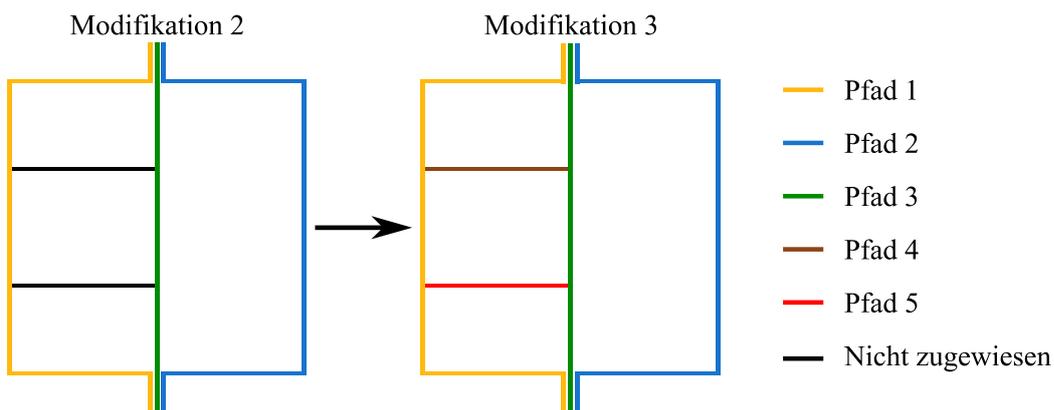


Abbildung 5-7: Graphmodifikation 3 – Erzeugen von Pfaden für alle verbleibenden inneren Edges

5.5 Modifikation 4: Verbinden von Pfaden

In diesem Schritt sollen die bereits erzeugten Pfade miteinander verbunden werden, um die Anzahl der Bleche und folglich auch die der Fügestellen zu reduzieren. Vor allem wird die Zahl der Fügestellen an Blechenden verringert, wodurch die Fügbarkeit verbessert wird, da Flansche an Blechenden restriktiver im Fügeprozess sind als solche in der Mitte vom Blech (wird später in den Abschnitten 7.4 und 7.5 erläutert).

Die Enden von Pfaden, die in einen Customflange integriert sind, können dort nicht sinnvoll mit anderen Pfaden verbunden werden und werden deswegen nicht berücksichtigt (s. Abbildung 5-8 – Pfad 1, Pfad 2 und Pfad 3). Das Verbinden von Pfaden wird nur für die Pfade durchgeführt, die aus inneren Edges bestehen und einen Vertex auf der äußeren Kontur besitzen (Pfad 4 und Pfad 5).

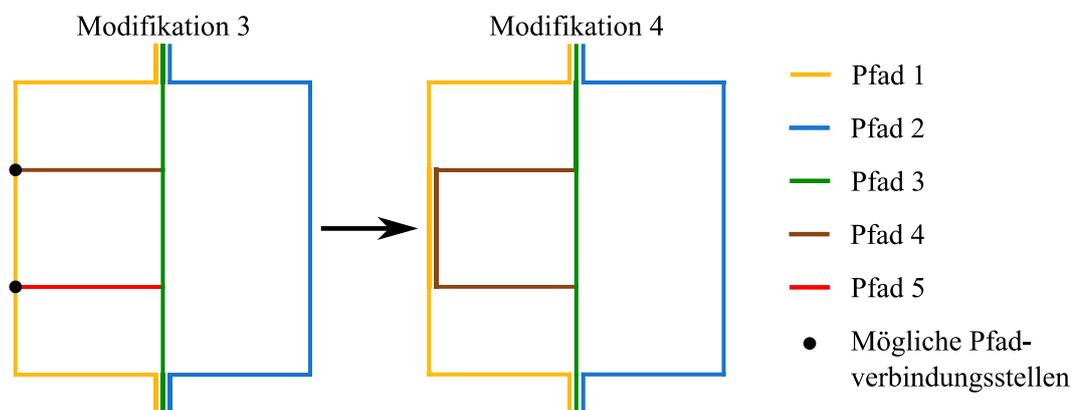


Abbildung 5-8: Graphmodifikation 4 – Verbinden von Pfaden der inneren Edges

Zur Bestimmung dieser Pfade werden die Vertices am Anfang und am Ende der Pfade ermittelt, die nicht mit einem Customflange verbunden sind (Pfade 4 und 5). Wenn sich einer dieser Vertices einen Vertex mit einer äußeren Edge teilt (schwarz markierte Vertices), wird der dazugehörige Pfad einer Liste hinzugefügt. Danach wird kombinatorisch versucht, alle Pfade dieser Liste an den Vertices, die sie sich mit den äußeren Edges teilen, paarweise zu verbinden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Verbindung zwischen den beiden Pfaden so weit nach innen versetzt wird, dass die gewünschte Größe des Fügepalts zwischen den Edges unter Berücksichtigung der Wandstärken erreicht wird. Begonnen wird bei der Kombination von Vertices mit der geringsten Entfernung zueinander. Der Benutzer kann Werte für die maximale und die minimale Länge der Verbindungsedge in der Konfigurationsdatei definieren.

Für jede Kombination wird die Einhaltung der Fertigungsrestriktionen überprüft. Dies beinhaltet auch die Prüfung auf Überschneidungen von Edges (wird später in den Abschnitten 7.1 und 7.2 erläutert). Bei Einhaltung der Fertigungsrestriktionen wird der

Vorschlag akzeptiert und die beiden Pfade werden miteinander verbunden. Die verbundenen Pfade werden aus der Liste mit Optionen entfernt und die Suche nach weiteren Pfaden, die verbunden werden können, wird fortgesetzt, bis alle Kombinationen überprüft wurden.

5.6 Modifikation 5: Erzeugen von Flanschen und Fügeverbindungen

In den bisherigen Schritten wurden die Flansche der Customflanges erzeugt. Im jetzigen Schritt werden die übrigen Flansche erstellt, die sich an Pfaden von inneren Edges befinden (s. Abbildung 5-9). Dazu gehören die Flansche am Anfang und am Ende des Pfads, aber auch solche, die sich innerhalb des Pfads befinden. Die Ausrichtung der Flansche ist wesentlich: Sie müssen im Fügeprozess zugänglich sein und so positioniert werden, dass sie mit den Werkzeugen beim Fügen erreicht werden können.

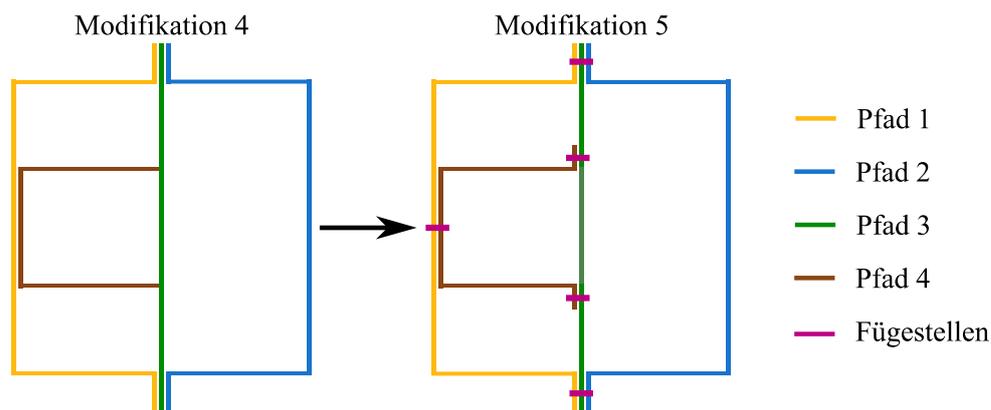


Abbildung 5-9: Graphmodifikation 5 – Erzeugen von Flanschen und Fügeverbindungen

Für jeden Pfad wird an allen seinen Verbindungsstellen zu anderen Pfaden ein Flansch erzeugt. Im Graphen ist dies daran zu erkennen, dass unterschiedliche Pfade einen Vertex teilen. Es wird zwischen zwei Flanschtypen unterschieden. Die Flansche innerhalb eines Pfads werden symmetrisch an der Verbindungsstelle mit dem anderen Pfad ausgeprägt. Dadurch wird die Neigung der beiden an den Flansch angrenzenden Edges leicht verändert (s. Abbildung 5-10 im rechten Bild am rechten äußeren Flansch). Die Flansche am Start und am Ende von Pfaden werden so positioniert, dass sich die Neigung der angrenzenden Edge nicht weiter verändert. Der Abstand der Mittelfläche der Flanschpartner berechnet sich aus der halben Dicke beider Pfade zuzüglich dem Füge-spalt.

Die Flansche an den Pfadenden haben immer zwei Möglichkeiten, sich auszurichten. Diese beiden Optionen resultieren aus dem kleinsten Verbindungswinkel im und entgegengesetzt des Uhrzeigersinns zwischen dem Pfad, an dem der Flansch erzeugt werden soll, und den angrenzenden Pfaden. Um die bestmögliche Zugänglichkeit zu den Flanschen im Fügeprozess zu erhalten, werden die Flansche der Pfadenden so positioniert, dass sie vom Schwerpunkt des Pfads wegzeigen. Dadurch soll erreicht werden, dass die Flansche nach außen gerichtet sind. Hierzu wird der Schwerpunkt des Pfads ermittelt und die Richtungsvektoren von beiden möglichen Flanschausrichtungen werden bestimmt. Die Flanschposition wird dann so ermittelt, dass der Richtungsvektor des Flansches möglichst von dem Schwerpunkt des Pfads wegzeigt. Dazu kann der Abstand zwischen den Enden beider Flanschoptionen und dem Schwerpunkt des Pfads ermittelt werden. Der Flansch mit dem größeren Abstand zwischen Flanschende und Schwerpunkt wird ausgewählt.

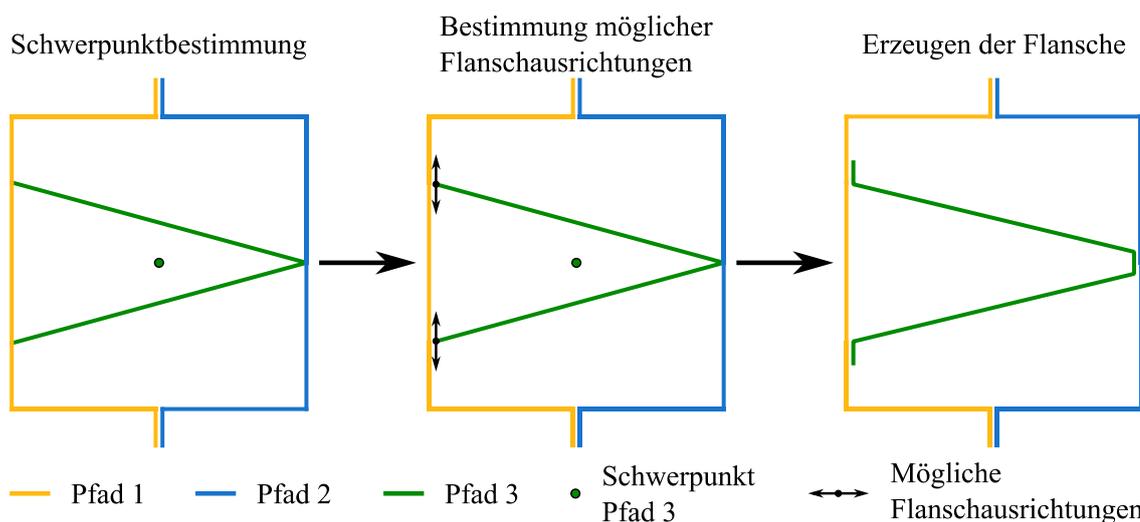


Abbildung 5-10: Positionierung und Ausrichtung von Flanschen an Pfadenden und innerhalb eines Pfads

6 Modellierung von Schweißverbindungen im Finite-Elemente-Modell

In der Simulation von Fahrzeugen mit finiten Elementen in Crashlastfällen spielt die Modellierung der Schweißverbindungen eine wichtige Rolle, da sie einen direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Simulation und den Berechnungsaufwand hat. Eine vereinfachte Darstellung der Schweißverbindung reduziert den Berechnungsaufwand, dies kann jedoch auch die Genauigkeit der Simulation beeinflussen, da das Versagen von Schweißverbindungen einen mittelbaren Einfluss auf die Strukturintegrität und das Deformationsverhalten hat.

Prinzipiell wird bei der Modellierung von Schweißverbindungen zwischen Balken- (1D), Schalen- (2D) und Volumenelementen (3D) unterschieden. Eine detailliertere Modellierung eines Schweißpunktes führt zu einem größeren Berechnungsaufwand (Palmonella et al. 2005). Da ein Fahrzeug mehrere Tausend Schweißpunkte enthalten kann, fällt dies besonders ins Gewicht. Ein Ansatz ist beispielsweise die Modellierung der Schweißpunkte mit einem groben FE-Netz (Palmonella et al. 2005), wodurch die Berechnungszeit reduziert wird.

In Fahrzeugmodellen werden oft Balkenelemente (Palmonella et al. 2005) in Verbindung mit einem Versagensmodell genutzt, um Schweißpunkte abzubilden. Die Balkenelemente können Kräfte sowie Momente zwischen den Blechen übertragen und das allgemeine Verhalten des Schweißpunkts gut abbilden. Da jeder Schweißpunkt mit einem Balkenelement und nicht mit Volumenelementen modelliert wird, sind keine detaillierten Informationen über die Spannungen innerhalb des Schweißpunkts vorhanden. Das Versagensmodell kann die maximal zulässigen Kräfte oder Spannungen der Schweißpunkte in Normal- und Schubrichtung verwenden.

Der Ansatz zur Modellierung von Schweißpunkten mit Balkenelementen und einem Versagensmodell wird auch in dieser Arbeit verfolgt. Die Simulationsmodelle werden mit dem Softwareprogramm Pam-Crash der Firma ESI Group generiert und berechnet. Für jeden Schweißpunkt wird eine 1D-PLINK-Verbindung erzeugt, die beide Bleche eines Flansches miteinander verbindet (Abbildung 6-1). Für Verbindungen mit mehr als zwei Blechen in einer Flanschverbindung wird jeweils zwischen zwei Blechen ein PLINK erzeugt. Ein Schweißpunkt zwischen drei Blechen wird dementsprechend mit zwei PLINKS abgebildet. Die Bleche werden mit zweidimensionalen Schalenelementen diskretisiert. Als Elementformulierung werden Belytschko-Tsay-Elemente verwendet.

Als Materialmodell wird ein Link-Material für PLINKs genutzt (MATYP 302). Darin werden alle translatorischen und rotatorischen Abweichungen des PLINKs von seiner

Ausgangsposition durch Kräfte und Momente korrigiert, wodurch ein physikalisches Schweißpunktmodell abgebildet werden kann ($IDOF = 0$) (ESI Group 2021).

In dem Materialmodell ist ein Versagensmodell (RUPMO) mit einem Lastkriterium ($IRUPT = 0$) hinterlegt, das die maximal zulässigen Werte für die Kopfzug- und Scherzugkraft verwendet. Diese Werte werden für jede Blechpaarung berechnet. Der Abstand der Schweißpunkte eines Flansches zueinander (senkrecht zur Querschnittsrichtung) kann in der Konfigurationsdatei eingestellt werden.

Für die Modellierung einer Schweißnaht werden einreihig angeordnete PLINKs verwendet, die im Vergleich zu den Schweißpunkten einen geringeren Abstand zueinander haben. Somit kann die höhere Festigkeit einer Schweißnahtverbindung berücksichtigt werden. Die Materialänderung in der Schweißeinflusszone wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Diese Änderungen können jedoch nachträglich in den Prozess implementiert werden.

Die PLINKs werden zwischen den FE-Knoten der Bleche erzeugt. Dadurch werden ihre möglichen Positionen diskret vorgegeben und sind von der Elementkantenlänge beim Vernetzen abhängig. Prinzipiell ist es jedoch auch möglich den, Modellerzeugungsprozess so anzupassen, dass nicht nur diskrete Positionen der PLINKs verwendet werden können. Dafür müssen die Positionen bereits beim Vernetzen berücksichtigt werden.

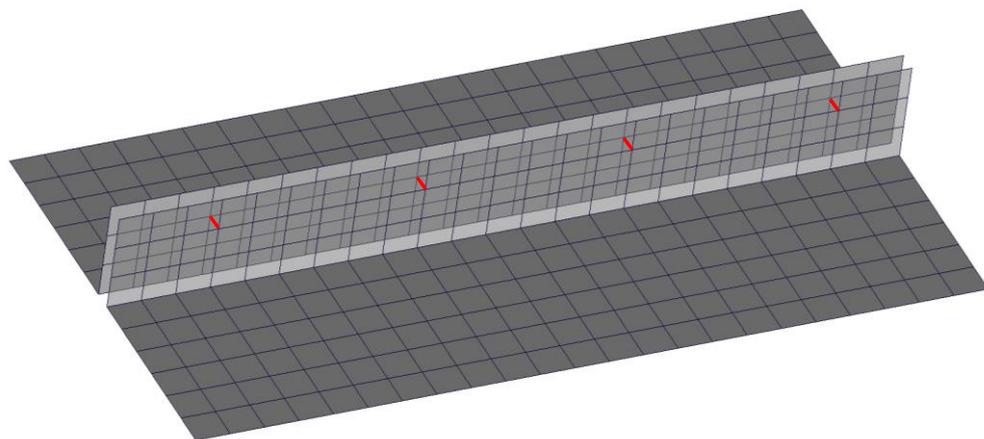


Abbildung 6-1: Finite Elemente Modell von zwei mit PLINKs (rot) verbundenen Blechen – vorderes Blech des Flansches mit geringer Transparenz dargestellt

Für das Versagensmodell der PLINKs muss die maximale Kopfzug- und Scherzugkraft der Schweißpunkte berechnet werden. Bei unterschiedlichen Blechdicken in der Profilstruktur wird für jede Blechpaarung eine eigene Materialkarte mit Versagensmodell erzeugt. Abbildung 6-2 zeigt beispielhaft die Beanspruchung einer Schweißlinie auf Zug (links) und Scherung (rechts). Diese Werte könnten mit einem großen Aufwand für diverse Blechdickenpaarungen und Materialien experimentell bestimmt werden.

Hier wird auf die analytischen Zusammenhänge zwischen den geometrischen Abmessungen der Blechpaarung und dem dazugehörigen Material zurückgegriffen. Dazu gibt es zum Beispiel ein Modell zur Versagensvorhersage von Chao, das auf der Art der Belastung (Zug und Scherung) und der Spannungsverteilung an der Schweißlinse basiert (Chao 2003). In Kombination mit dem von Mises-Kriterium wird die Versagenskraft ermittelt.

In dieser Arbeit wird jedoch ein vereinfachteres Modell zur Berechnung der Versagenskraft verwendet, das bei der Berechnung der Festigkeit der Punktschweißverbindung ein auf Abscheren belasteten Stift zugrunde legt (Decker und Kabus 2018).

Die allgemeingültige Formel zur Berechnung einer Scherkraft F lautet:

$$F = A_w \cdot \tau \quad (6-1)$$

F	in N	Scherkraft
A_w	in mm ²	Wirkfläche der Scherkraft (Querschnittsfläche)
τ	in N/mm ²	Scherspannung

Die Scherkraft die zum Versagen einer einschnittigen Schweißverbindung mit einem Schweißpunkt führt (s. Abbildung 6-2 rechts), ergibt sich aus dem Produkt der Schubspannung (hier Scherfestigkeit des Bauteilwerkstoffs) und der Wirkfläche am Schweißpunkt:

$$F_{wB} = A_{wQ} \cdot \tau_{wB} \quad (6-2)$$

F_{wB}	in N	Scherkraft bei Versagen der Schweißpunktverbindung
A_{wQ}	in mm ²	Wirkfläche der Schweißlinse (hier Querschnittsfläche)
τ_{wB}	in N/mm ²	Scherfestigkeit des Bauteilwerkstoffs

Wenn die Scherfestigkeit der Schweißlinse nicht bekannt ist, kann erfahrungsgemäß die Zugfestigkeit des Bauteilwerkstoffs zur Berechnung herangezogen werden (Decker und Kabus 2018):

$$\tau_{wB} = 0,65 \cdot R_m \quad (6-3)$$

Mit der Querschnittsfläche der Schweißlinse:

$$A_{wQ} = d_{sp}^2 \cdot \frac{\pi}{4} \quad (6-4)$$

und dem angenäherten Schweißpunktdurchmesser:

$$d_{sp} = \sqrt{25mm \cdot w_{min}} \quad (6-5)$$

ergibt sich die Scherkraft bei Versagen eines Schweißpunkts zu:

$$F_{wB} = 0,65 \cdot R_m \cdot 25\text{mm} \cdot w_{min} \cdot \frac{\pi}{4} \quad (6-6)$$

F_{wB}	in N	Scherkraft bei Versagen der Schweißpunktverbindung
d_{sp}	in mm	Schweißpunktdurchmesser
w_{min}	in mm	kleinste Blechdicke der Schweißverbindung
R_m	in N/mm ²	Zugfestigkeit des Bauteilwerkstoffs

Wenn eine Schweißpunktverbindung wie in Abbildung 6-2 (links) mit einer Zugkraft beansprucht wird, kann es zu einem Ausknöpfen der Schweißlinse kommen (Decker). Der Berechnung für die Kopfzugkraft wird ein Ausknöpfen der Schweißlinse zugrunde gelegt, ein mögliches Reißen der Schweißlinse wird nicht berücksichtigt. Die Kopfzugkraft bei Versagen der Schweißpunktverbindung ergibt sich analog zu der Scherzugkraft.

Die Kopfzugkraft, die zum Versagen einer einschnittigen Schweißverbindung mit einem Schweißpunkt führt (s. Abbildung 6-2 links), ergibt sich nach Formel (6-1) aus dem Produkt der Scherspannung (hier Scherfestigkeit des Bauteilwerkstoffs) und der Wirkfläche am Schweißpunkt:

$$F_{wK} = A_{wM} \cdot \tau_{wB} \quad (6-7)$$

F_{wK}	in N	Kopfzugkraft bei Versagen der Schweißpunktverbindung
A_{wM}	in mm ²	Wirkfläche der Schweißlinse (Mantelfläche)
τ_{wB}	in N/mm ²	Scherfestigkeit des Bauteilwerkstoffs

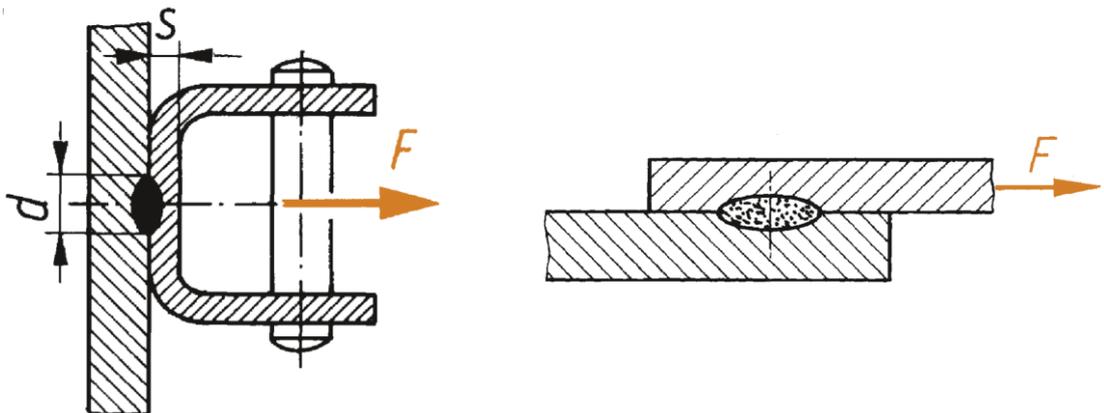


Abbildung 6-2: Einschnittige Schweißpunktverbindung auf Zug (links) und Scherung (rechts) beansprucht. (Decker und Kabus 2018)

Mit dem Schweißpunktdurchmesser (6-5) und der Mantelfläche der Schweißlinse:

$$A_{wM} = d_{sp} \cdot \pi \cdot w_{min} \quad (6-8)$$

ergibt sich die Kopfzugkraft F_{wK} der einzelnen Schweißverbindung:

$$F_{wK} = 0,65 \cdot R_m \cdot \sqrt{25\text{mm} \cdot w_{min}} \cdot \pi \cdot w_{min}. \quad (6-9)$$

7 Involvierung von Fertigungsrestriktionen

7.1 Allgemeine Fertigungsrestriktionen

In diesem Abschnitt werden die allgemeinen Fertigungsrestriktionen der GHT vorgestellt, die ursprünglich für die Optimierung von Strangpressprofilen entwickelt wurden. Obwohl sie nicht speziell für Blechstrukturen erarbeitet wurden, sind sie so allgemein gehalten, dass sie auch bei der Überprüfung der Fertigbarkeit von Blechstrukturen einen sinnvollen Beitrag leisten können.

Die Fertigungsrestriktionen können unmittelbar und mit nahezu keinem Berechnungsaufwand am Graphen überprüft werden. Die Überprüfung der Fertigbarkeit jedes Entwurfs stellt sicher, dass der optimierte Entwurf fertigbar ist und auch im Optimierungsablauf nur solche Entwürfe berechnet werden.

Ortmann hat in seiner Dissertation *Entwicklung eines graphen- und heuristikbasierten Verfahrens zur Topologieoptimierung von Profilquerschnitten für Crashlastfälle* (Ortmann 2015) Fertigungsrestriktionen für das Strangpressen entwickelt und in der GHT implementiert. In der neuen Veröffentlichung *Crashworthiness design of cross-sections with the Graph and Heuristic based Topology Optimization incorporating competing designs* werden die aktuellen Fertigungsrestriktionen vorgestellt (Ortmann et al. 2021). Abbildung 7-1 zeigt die allgemeinen Fertigungsrestriktionen der GHT. Die Grenzwerte für die Fertigungsrestriktionen werden in der Konfigurationsdatei eingestellt.

Minimale und maximale Wanddicken: Überprüft die Einhaltung der minimalen und maximalen Wanddicken.

Mindestabstände zwischen Edges: Überprüft die Mindestabstände zwischen zwei Wänden unter Berücksichtigung der Wanddicken. Dabei werden beide Wände mit mehreren Punkten diskretisiert und die Einhaltung der Abstände wird überprüft.

Minimale Verbindungswinkel zwischen verbundenen Edges: Überprüft die Einhaltung von Mindestwinkeln zwischen zwei verbundenen Wänden. Dazu wird der Schnittpunkt beider Wände ermittelt und der Verbindungswinkel bestimmt.

Kammerverhältnis: Überprüft das Kammerverhältnis der flächenmäßig größten zur kleinsten Kammer im Querschnitt.

Maximale Kammeranzahl: Überprüft die Einhaltung der maximal erlaubten Kammerzahl.

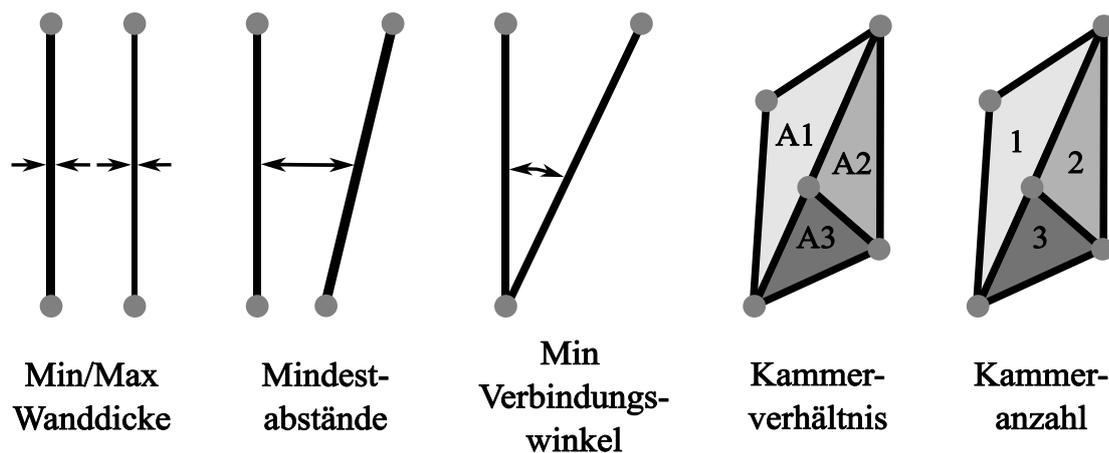


Abbildung 7-1: Allgemeine Fertigungsrestriktionen der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung

7.2 Detektion der Überschneidung von *Edges*

In dieser Überprüfung wird bestimmt, ob sich die *Edges* eines Graphen überschneiden. Sie findet nur in dem Geometriebereich der *Edges* statt, in dem diese definiert sind, also zwischen dem Start- und Endvertex. Eine Überschneidung außerhalb des definierten Bereichs der verglichenen *Edges* wird nicht berücksichtigt.

In der Überprüfung auf Überschneidung werden alle *Edges* eines Graphen miteinander verglichen. Es finden für jede Kombination von zwei *Edges* folgende Überprüfungen statt:

- Fall 1: Überprüfen der *Edges* auf Parallelität
- Fall 2: Überprüfen von Überschneidungen in den Teilsegmenten der *Edges*

Fall 1: Überprüfen der *Edges* auf Parallelität

Für jede Paarung von *Edges* wird zunächst festgestellt, ob die *Edges* parallel verlaufen. Wenn zwei *Edges* denselben oder einen entgegengesetzten Richtungsvektor haben, gelten die Richtungsvektoren als skalares Vielfaches voneinander. Die *Edges* sind somit parallel zueinander. Das Vektorprodukt der Vektoren \vec{a} und \vec{b} ergibt einen Vektor \vec{c} , der senkrecht auf ihnen steht (s. Abbildung 7-2).

Die Vektoren \vec{a} und \vec{b} spannen ein Parallelogramm auf, dessen Flächeninhalt der Länge von Vektor \vec{c} entspricht. Wenn \vec{c} ein Nullvektor ist, sind \vec{a} und \vec{b} zueinander parallel. Dementsprechend gilt, dass zwei vom Nullvektor verschiedene Vektoren \vec{a} und \vec{b} parallel sind, wenn ihr Vektorprodukt verschwindet (Papula 2014):

$$\vec{a} \times \vec{b} = \vec{0} \quad (7-1)$$

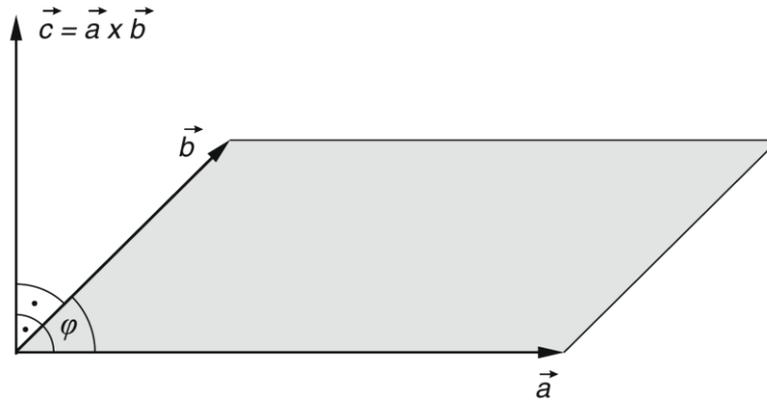


Abbildung 7-2: Darstellung des Vektorprodukts zweier Vektoren (Papula 2014)

Sind die beiden Richtungsvektoren der überprüften Edges parallel, können sie auch aufeinanderliegen. Das Kriterium der Parallelität ist für diese Überprüfung also allein nicht ausreichend, da übereinanderliegende Edges eine Kollision erzeugen und nicht erlaubt sind.

Um zu überprüfen, ob zwei parallele Edges mit den Richtungsvektoren \vec{a}_1 und \vec{a}_2 mit den Vektoren zu ihren Startpunkten \vec{r}_1 und \vec{r}_2 aufeinanderliegen, kann der Abstand d zwischen ihnen ermittelt werden (s. Abbildung 7-3 und Papula 2014):

$$d = \frac{|\vec{a} \times (\vec{r}_2 - \vec{r}_1)|}{|\vec{a}|} \quad (7-2)$$

Für $d = 0$ liegen die Edges aufeinander. Wenn die Richtungsvektoren der Edges parallel zueinander verlaufen und nicht aufeinanderliegen, ist der Check für diese Kombination von Edges abgeschlossen und die verbliebenen Kombinationen von Edges werden überprüft. Liegen die Edges aufeinander, wird der gesamte Check abgebrochen und der Graph wird als nicht fertigbar deklariert. Wenn die Richtungsvektoren der Edges nicht parallel sind, muss Fall 2 überprüft werden.

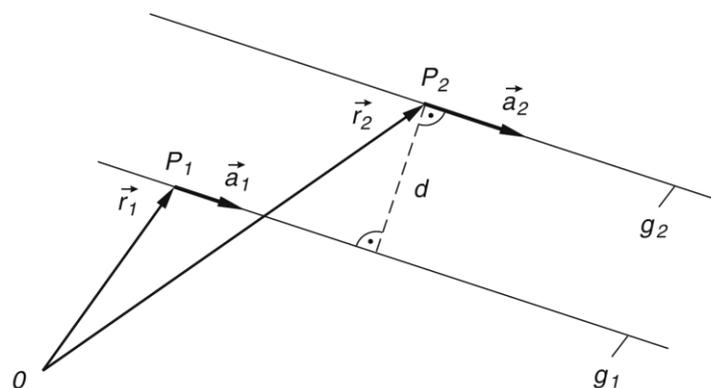


Abbildung 7-3: Abstand zwischen zwei parallelen Geraden (Papula 2014)

Fall 2: Überprüfen von Überschneidungen in den Teilsegmenten der Edges

Sofern zwei Geraden nicht parallel sind und in einer Ebene liegen, haben sie einen Schnittpunkt. Liegt der Schnittpunkt innerhalb der Teilsegmente der Edges, ist dies eine relevante Überschneidung und die gesamte Überprüfung wird vorzeitig beendet. Wenn der Schnittpunkt außerhalb des definierten Bereichs der Edges liegt, wird keine Überschneidung festgestellt und die Überprüfung wird für weitere Kombinationen von Edges fortgeführt.

Im Folgenden werden die Gleichungen für die Überschneidungsprüfungen vorgestellt. Die Gerade L_1 kann durch die Endpunkte $P_1 = (x_1, y_1)$ und $P_2 = (x_2, y_2)$ des Teilsegments der Geraden beschrieben werden (s. Abbildung 7-4 und Antonio 1992):

$$L_1 = \vec{P}_1 + u_1 * (\vec{P}_2 - \vec{P}_1) \quad (7-3)$$

Analog zu L_1 kann die Gerade L_2 durch die Punkte $P_3 = (x_3, y_3)$ und $P_4 = (x_4, y_4)$ beschrieben werden:

$$L_2 = \vec{P}_3 + u_2 * (\vec{P}_4 - \vec{P}_3) \quad (7-4)$$

Die Teilsegmente mit den Punkten P_1, P_2 und P_3, P_4 entsprechen zwei Edges, die auf Überschneidung untersucht werden sollen.

Der Schnittpunkt P der Geraden L_1 und L_2 kann durch Gleichsetzen der Geradengleichung ermittelt werden:

$$\vec{P}_1 + u_1 * (\vec{P}_2 - \vec{P}_1) = \vec{P}_3 + u_2 * (\vec{P}_4 - \vec{P}_3) \quad (7-5)$$

Nach der Umformung ergeben sich die Parameter u_1 und u_2 der Geradengleichungen L_1 und L_2 zu:

$$u_1 = \frac{(y_3 - y_4) * (x_1 - x_3) - (x_3 - x_4) * (y_1 - y_3)}{(y_2 - y_1) * (x_3 - x_4) - (x_2 - x_1) * (y_3 - y_4)} \quad (7-6)$$

$$u_2 = \frac{(x_2 - x_1) * (y_1 - y_3) - (y_2 - y_1) * (x_1 - x_3)}{(y_2 - y_1) * (x_3 - x_4) - (x_2 - x_1) * (y_3 - y_4)} \quad (7-7)$$

Durch Einsetzen der Parameter u_1 bzw. u_2 in die Geradengleichungen kann der Schnittpunkt bestimmt werden. Wenn beide Parameter u_1 und u_2 im Intervall $[0,1]$ liegen, schneiden sich die beiden Geraden innerhalb der Teilsegmente (Antonio 1992) und die Überprüfung wird vorzeitig beendet.

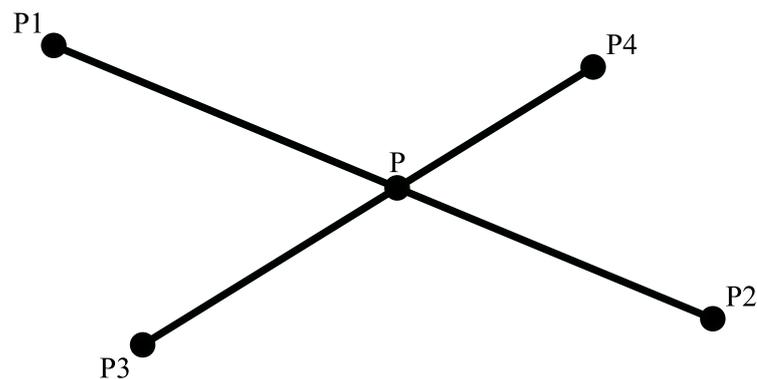


Abbildung 7-4: Schnittpunkt zweier Teilsegmente von Geraden (modifiziert nach (Antonio 1992))

7.3 Fertigungsrestriktion: Biegeumformen von Blechen mittels Schwenkbiegen

Das Schwenkbiegen wird dem Biegeumformen mit drehendem Werkzeug zugeordnet. Dabei wird ein Blech zwischen der Ober- und Unterwange fixiert (s. Abbildung 7-5). Die Biegewange formt den Schenkel des Blechs auf den angestrebten Winkel. Abhängig von der gewünschten Biegerichtung des Schenkels muss das Blech gewendet werden. Es existieren jedoch auch Maschinen, bei denen der Vorgang des Wendens entfällt (Doege 2016).

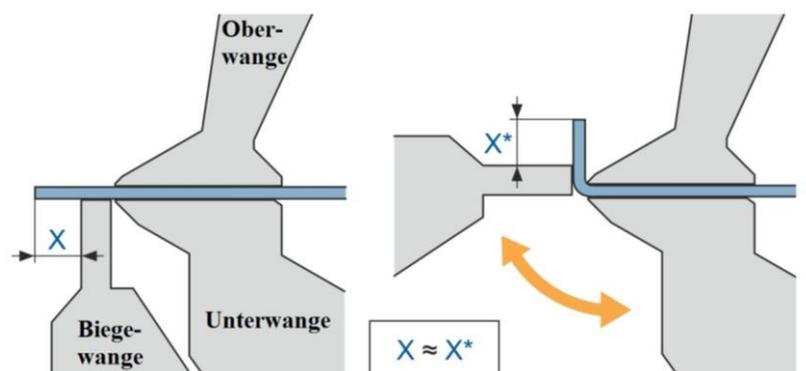


Abbildung 7-5: Prinzip des Schwenkbiegens, schematisch dargestellt (modifiziert nach (ras-online 2020))

Ein vereinfachter Prozess des Schwenkbiegens wird simuliert, um eine Abschätzung über die Fertigbarkeit im geometrischen Umformungsprozess von Blechen zu treffen. Dazu wird der Anfangs- und Endzustand jedes Biegeschritts dargestellt und mittels Kollisionsüberprüfung (s. Abschnitt 7.2) wird festgestellt, ob ein Kontakt zwischen dem Blech und der Schwenkbiegevorrichtung stattfindet. Wenn ein Blech, ausgehend

von einem Ende, nicht fertigbar ist, wird versucht, es beginnend von dem anderen Ende umzuformen.

Das Material des Blechs hat einen großen Einfluss auf die Rückfederung beim Biegeumformen. Bleche mit höheren Festigkeiten weisen tendenziell eine höhere Rückfederung auf als solche mit niedrigen Festigkeiten. Deswegen ist es bei der Fertigung erforderlich, den nötigen Biegewinkel zu berechnen und die Rückfederung durch Überbiegen zu kompensieren. Ein Überbiegen der Bleche aufgrund der elastischen Rückfederung wird in der Kollisionsüberprüfung nicht berücksichtigt. Der Schwerpunkt liegt auf der Kollisionsüberprüfung des Blechs mit der Schwenkbiegevorrichtung und nicht auf den werkstofftechnischen Aspekten. Somit werden auch maximal zulässige Biegewinkel und Radien zunächst nicht einbezogen. Eine Erweiterung ist prinzipiell möglich und in Zukunft sinnvoll.

Der Ablauf der Umformung ist kinematisch umgekehrt dargestellt. Für diese Anwendung heißt das konkret, dass die Biegewange stillsteht und die Ober- sowie Unterwange einschließlich Blech rotiert wird. Die Geometrie von Ober-, Unter- und Biegewange ist als Graph hinterlegt und kann beliebig verändert werden.

Die Kollisionsüberprüfung beim Biegeumformen der einzelnen Bleche wird am Beispiel in Abbildung 7-6 veranschaulicht.

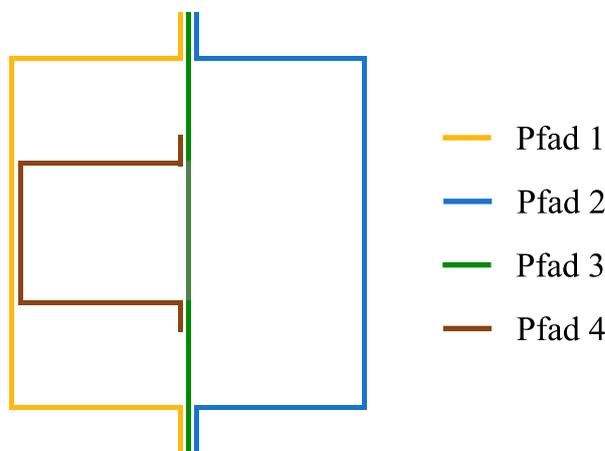


Abbildung 7-6: Entwurf für die Kollisionsüberprüfung beim Biegeumformen

Die Laufzeit für diese Kollisionsüberprüfung beträgt 0,015 Sekunden und ist damit sehr kurz. Die Umformungsschritte für Pfad 2 sind in Abbildung 7-7 dargestellt. Die Umformwerkzeuge (Ober-, Unter- und Biegewange) sind grau schattiert. Für jeden Umformungsschritt wird vor und nach der Umformung überprüft, ob eine Kollision zwischen dem Werkzeug und dem Blech stattfindet. Die verwendeten Inkremente in der Überprüfung können verfeinert werden. Die Kollisionsüberprüfung für Pfad 2 wurde erfolgreich beendet. Das durch den Pfad 2 repräsentierte Blech kann ohne Kollisionen auf die vorgegebene Form umgeformt werden.

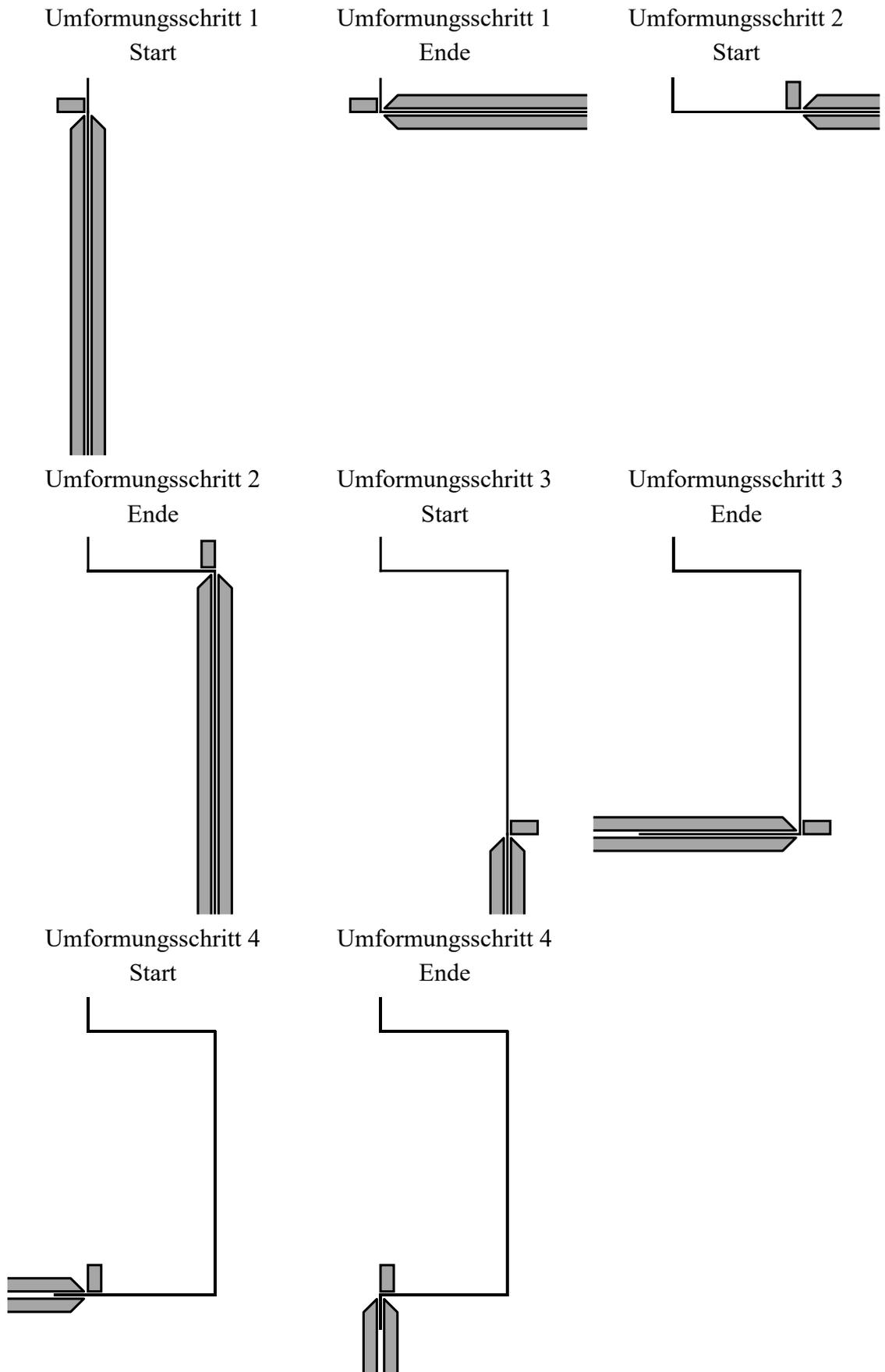


Abbildung 7-7: Umformungsschritte mit Kollisionsüberprüfung für Pfad 2 aus Abbildung 7-6

Die Kollisionsüberprüfung für Pfad 1 wird hier nicht gezeigt, da Pfad 1 und Pfad 2 symmetrisch sind. Pfad 3 ist ein ebenes Blech und besitzt keine Umformungen. Pfad 4 ist von seiner Form ähnlich zu Pfad 1 und Pfad 2, die Schenkel des Hutprofils sind jedoch weiter zusammen. Für Pfad 4 wurde keine Kollision zwischen dem Pfad und den Werkzeugen festgestellt (s. Abbildung 7-8). Somit sind laut der vereinfachten Simulation des Biegeumformens die Bleche aller vier Pfade fertigbar. In Anhang A in Abbildung A-1, Abbildung A-2 und Abbildung A-3 ist die Kollisionsüberprüfung für ein Trapezprofil dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass mit der Fertigungsrestriktion für das Biegeumformen von Blechen auch Trapezprofile berücksichtigt werden können.

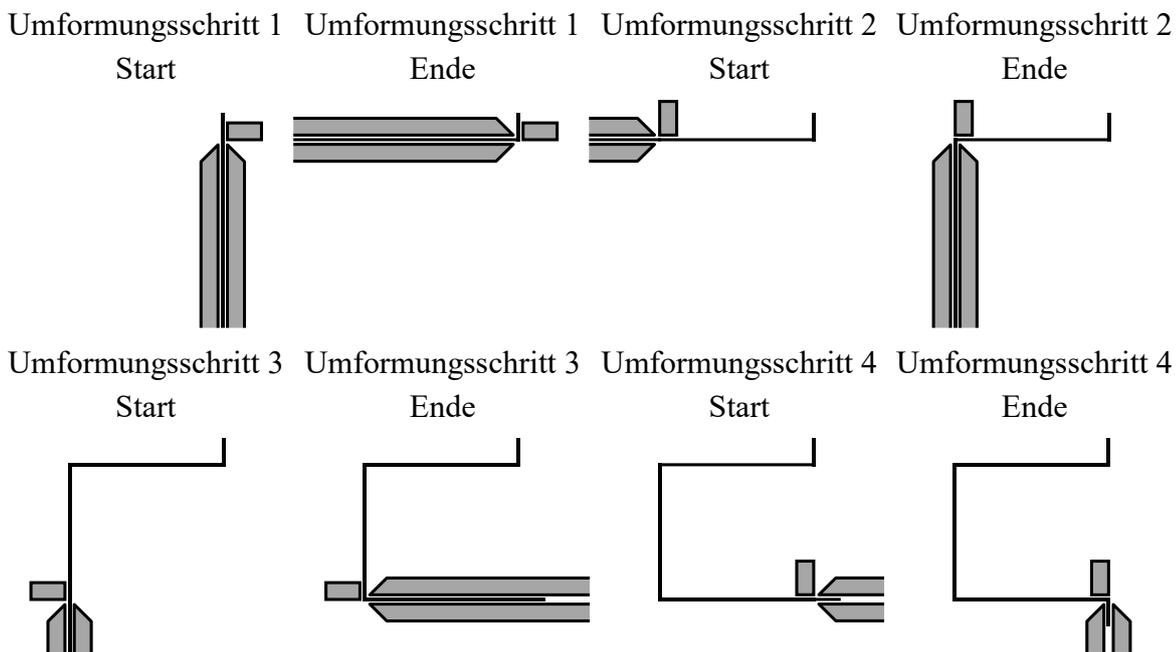


Abbildung 7-8: Umformungsschritte mit Kollisionsüberprüfung für Pfad 4 aus Abbildung 7-6

7.4 Fertigungsrestriktion: Fügen von Blechen durch Schweißen

Im Rahmen dieser Fertigungsrestriktion wird die Zugänglichkeit zu den Flanschen des Graphen überprüft. Ob der Zugang zu dem Flansch mit dem jeweiligen Schweißverfahren möglich ist, wird durch eine Kollisionsüberprüfung (s. Abschnitt 7.2) zwischen den Blechen und dem Werkzeug festgestellt. Wenn keine Kollision auftritt, das Werkzeug also an dem Flansch positioniert werden kann, gilt der Flansch als ffügbar. Entwürfe, die nicht ffügbar sind, können so detektiert werden und müssen in der Optimierung nicht weiter berücksichtigt werden.

Die Anforderung an die Zugänglichkeit zu den Flanschen ist vom Fügeverfahren abhängig. Mögliche Fügeverfahren sind das Widerstandspunktschweißen und das Laserstrahlschweißen. Beim Widerstandspunktschweißen muss der beidseitige Zugang der Elektroden zur Fügestelle möglich sein, während beim Laserstrahlschweißen in der Regel ein einseitiger Zugang ausreicht, wenn der Flansch ausreichend fixiert werden kann. In diesem Fertigungscheck können folgende Abwandlungen der beiden Schweißverfahren überprüft werden:

- Widerstandspunktschweißen rechtwinklig zur Oberfläche
- Widerstandspunktschweißen geneigt um einen Winkel α
- Laserstrahlschweißen rechtwinklig zur Oberfläche mit beidseitiger Fixierung
- Laserstrahlschweißen geneigt um einen Winkel β mit beidseitiger Fixierung
- Laserstrahlschweißen geneigt um einen Winkel β mit einseitiger Fixierung

Abbildung 7-9 zeigt links ein Beispiel zum Widerstandspunktschweißen zweier Bleche in der Seitenansicht. Die Elektroden sind beidseitig mittig am Flansch zentriert und haben einen rechten Winkel zur Oberfläche. Die Form der Elektroden kann verändert werden, um beispielsweise Schweißzangen mit einem anderen Bauraum abzubilden. Der verwendete Bauraum der Elektrode hat eine Breite von 10mm.

Der maximal zulässige Winkel α zwischen der Elektrode und der Normalen der Oberfläche wird in der Konfigurationsdatei definiert (s. Abbildung 7-9 und Abschnitt 6). Kann dieser Winkel nicht eingehalten werden, beispielsweise aufgrund einer eingeschränkten Zugänglichkeit zum Flansch, kann versucht werden, stattdessen das Laserstrahlschweißen zu verwenden (s. Abbildung 7-10). Der maximal zulässige Auftreffwinkel β für das Laserstrahlschweißen (siehe Abschnitt 6) wird in der Konfigurationsdatei definiert und ist in Abbildung 7-10 (links) dargestellt. Die Breite des Bauraums für den Laserstrahl und die der Werkzeuge zur Fixierung der Bleche sind vorgebar und können vom Anwender angepasst werden.



Abbildung 7-9: Senkrecht und geneigtes Widerstandspunktschweißen von Blechen

Bei der Fertigungsrestriktion für das Fügen von Flanschen mit Laserstrahlschweißen wird zwischen einseitigem und beidseitigem Zugang zum Flansch unterschieden. Im Schweißprozess müssen die Flanschpartner fixiert werden, damit ein flächiger Kontakt

am Flansch sichergestellt ist und sich die Bleche an der Fugestelle vollständig miteinander verbinden können. In der Regel ist es nicht ausreichend, die Flansche im Schweißprozess nur von einer Seite zu fixieren, da durch die Nachgiebigkeit am Flansch keine ausreichende Anpresskraft erzeugt werden kann und ein flächiger Kontakt zwischen den Flanschpartnern nicht gewährleistet ist. Dies gilt besonders für Flansche an Blechenden, die nicht abgestützt werden.

Wenn sich ein Flansch innerhalb eines Blechs zwischen zwei bereits gefügten Flanschen befindet, hat der Flansch bereits eine ausreichende Steifigkeit dafür, dass er einseitig verspannt und dann beispielsweise mit Laserstrahlschweißen gefügt werden kann (s. Abbildung 7-10 rechts). Dies setzt voraus, dass das Schweißverfahren keinen beidseitigen Zugang zur Fugestelle erfordert.

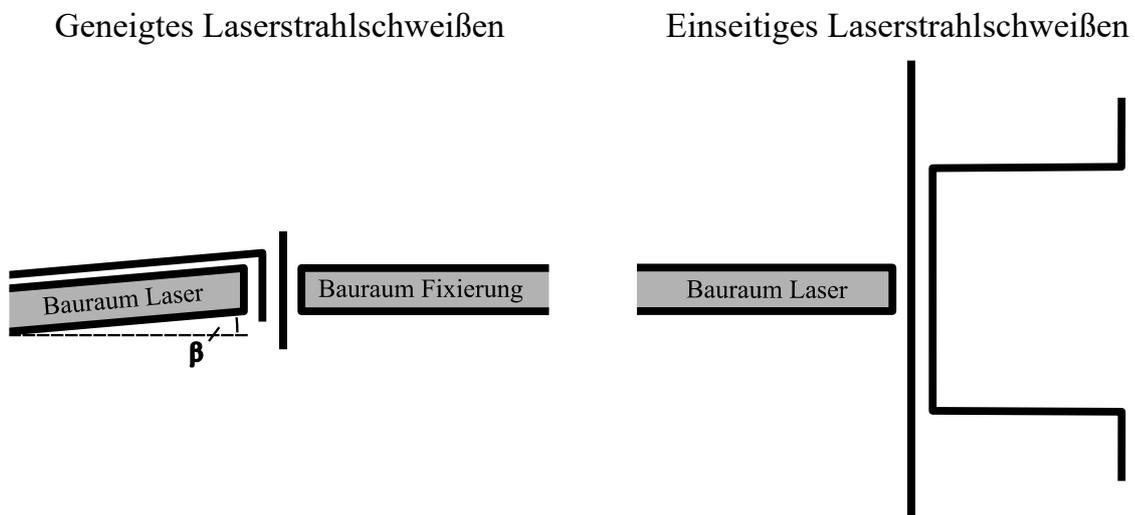


Abbildung 7-10: Senkrechtes und geneigtes Laserstrahlschweißen von Blechen

7.5 Bestimmung der Fügbarkeit und der Fügereihenfolge

Die Fügereihenfolge gibt an, in welcher Reihenfolge die Bleche einer Profilstruktur an ihren Flanschen miteinander gefügt werden müssen, damit alle Flansche mit dem jeweiligen Schweißverfahren erreichbar sind und die Schweißverbindungen erzeugt werden können. Die Fügereihenfolge setzt sich aus einer Aneinanderreihung von Fügeprozessen aller Fugestellen einer Struktur zusammen. Eine Fugestelle kann aus zwei oder mehr Blechen bestehen.

Zur Bestimmung der Fügereihenfolge werden zunächst alle möglichen Kombinationen von Fügereihenfolgen bestimmt. Die Anzahl der möglichen Kombinationen ohne Wiederholung ergibt sich aus der Zahl aller möglichen Permutationen der Fugestellen und berechnet sich aus der Gesamtanzahl der unterschiedlichen Fugestellen k im Profilquerschnitt:

$$\text{Anzahl Fügereihenfolgen ohne Wiederholung} = k! \quad (7-8)$$

Die Zahl der möglichen Fügereihenfolgen kann mit steigendem n schnell wachsen. Deswegen ist es sinnvoll, die Gesamtanzahl der Flansche der Struktur einzuschränken. Als maximaler Wert hat sich $k = 7$ oder $k = 8$ bewährt, wodurch maximal 5040 bzw. 40 320 Fügereihenfolgen für einen Entwurf untersucht werden.

Zunächst wird über alle möglichen Fügereihenfolgen iteriert. Abhängig von den bereits gefügten Blechen werden nur diejenigen im aktuellen Fügeschritt berücksichtigt, die für selbigen notwendig sind. Dazu wird der Flansch des aktuellen Fügeschritts betrachtet und alle in dem Flansch gefügten Bleche werden ermittelt. Von diesen Blechen werden wiederum die Flanschenden bestimmt. Wenn diese Flansche in einem früheren Schritt des aktuellen Fügescenarios bereits gefügt wurden, werden alle Bleche aus diesem Flansch auch in dem aktuellen Fügeschritt berücksichtigt. Dies passiert so lange, bis kein zu einem bereits gefügten Flansch gehörendes Blech mehr gefunden wird.

Es stehen mehrere Fügekonzepte zur Verfügung, die in der Konfigurationsdatei ausgewählt werden können:

- Fügekonzept 1: Widerstandspunktschweißen
- Fügekonzept 2: Laserstrahlschweißen
- Fügekonzept 3: Widerstandspunktschweißen und Laserstrahlschweißen

In den Fügekonzepten 1 und 2 wird nur das jeweilige Schweißverfahren verwendet. In Fügekonzept 3 wird Widerstandspunktschweißen präferiert, da es prinzipiell kostengünstiger ist und in der Automobilindustrie wenn möglich immer noch bevorzugt wird. Es hat jedoch eine geringere Designfreiheit als das Laserstrahlschweißen, da bei Letzterem größere Auftreffwinkel möglich sind (s. Abschnitt 2.5). Wenn eine Fügestelle nicht mit Widerstandspunktschweißen erzeugt werden kann, wird versucht, das Laserstrahlschweißen zu verwenden.

Der Anwender definiert den Bauraum für die Werkzeuge des jeweiligen Fügekonzepts. Abhängig von dem im Fügekonzept festgelegten Schweißverfahren wird im Rahmen der GHT der benötigte Bauraum ermittelt und die Zugänglichkeit zum Flansch wird wie in Abschnitt 7.4 beschrieben überprüft. Ist eine Sequenz einer Fügereihenfolge nicht fertigbar, werden die Kombinationen aus der Liste mit allen Fügereihenfolgen entfernt, die mit der gleichen nicht fertigbaren Sequenz beginnen.

Das Ergebnis der Fertigungsrestriktion ist entweder eine Fügereihenfolge, mit der die Struktur gefügt werden kann, oder es wird zurückgegeben, dass keine zulässige Fügereihenfolge gefunden wurde und die Struktur nicht fertigbar ist. Abbildung 7-11 zeigt eine mit dem Fügekonzept 3 bestimmte Fügereihenfolge. In dem Beispiel wird für das Widerstandspunktschweißen ein maximal zulässiger Winkel zwischen der Elektrode und der Normalen der Oberfläche von 5° verwendet. Beim Laserstrahlschweißen beträgt der maximal zulässige Auftreffwinkel 30° .

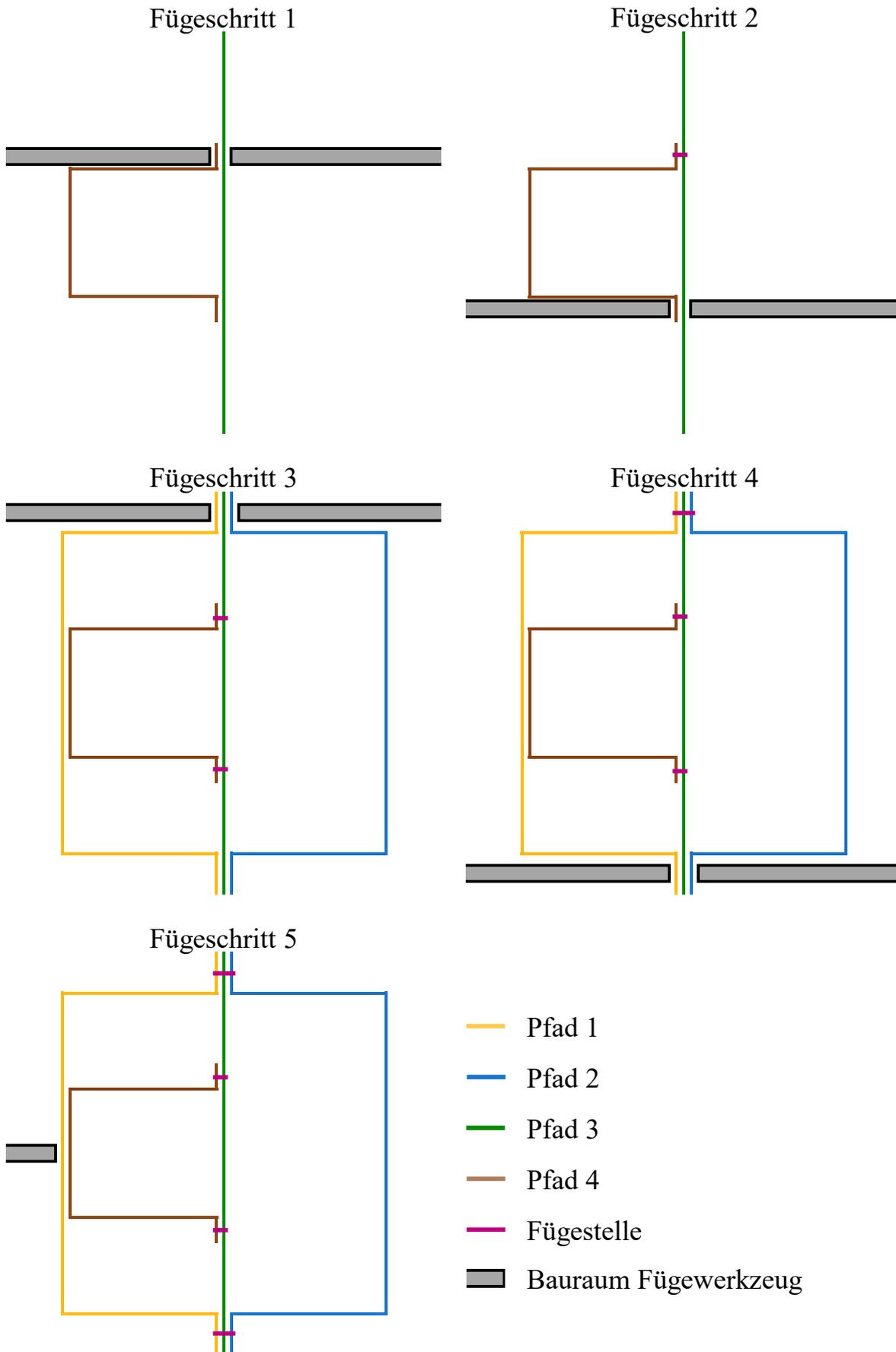


Abbildung 7-11: Fügereihenfolge des Profils aus Kapitel 5 (Abbildung 5-1)

Die Laufzeit zur Bestimmung der Fügbarkeit und der Fügereihenfolge für dieses Beispiel beträgt 0,039 Sekunden. Bei Graphen mit mehr Flanschen steigt die Laufzeit deutlich an, hier wurden bei Graphen mit mehr Fügstellen auch schon Laufzeiten von mehreren Minuten gemessen. Dies ist nicht verwunderlich, da sich die Anzahl der zu überprüfenden Fügereihenfolgen aus der Fakultätsfunktion ergibt und diese noch schneller wächst als die Exponentialfunktion.

In den Fügeschritten 1 und 2 wird das Hutprofil (Pfad 4) mit dem ebenen Blech (Pfad 3) an zwei Flanschen mit Widerstandspunktschweißen gefügt. Die Schweißpunkte an beiden Flanschen können theoretisch gleichzeitig erzeugt werden. In den Fügeschritten 3 und 4 werden die äußeren Schalen (Pfad 1 und Pfad 2) auf die bereits gefügte Teilstruktur (Pfad 3 und Pfad 4) aufgesetzt und die äußeren Flansche werden mit Widerstandspunktschweißen gefügt. Im Fügeschritt 5 kann der letzte Flansch zwischen Pfad 1 und Pfad 4 durch Laserstrahlschweißen mit einseitiger Zugänglichkeit gefügt werden, da die angrenzenden Flansche von Pfad 4 bereits gefügt wurden und somit an dem Flansch eine ausreichende Steifigkeit vorhanden ist (s. Abschnitt 7.4).

8 Heuristiken zur Topologieänderung, Formänderung und Dimensionierung

Die besondere Herausforderung bei der Optimierung von crashbelasteten Strukturen ist der Umgang mit dem höchst nicht linearen Verhalten und den auftretenden Bifurkationen in der Simulation. Hier können mathematische Verfahren allein nicht sinnvoll eingesetzt werden (s. Abschnitt 2.3). Die GHT löst diese Herausforderung, indem ein heuristischer Ansatz verwendet wird, um die Topologie und Form von Strukturen zu verändern.

Eine Gruppe der Heuristiken der GHT verändert die Topologie eines Entwurfs. Diese Heuristiken haben fast alle gemeinsam, dass sie die Simulationsdaten auswerten und auf deren Grundlage eine Topologieänderung für einen Entwurf vorschlagen. Dazu werden

- die Verschiebungen,
- die Geschwindigkeiten von FE-Knoten,
- die inneren Energien von Elementen und
- die Schädigung sowie das Versagen von Elementen

ausgelesen und ausgewertet.

Prinzipiell können Heuristiken beliebige Strukturantworten verwenden, die aus dem Simulationsmodell extrahiert werden können.

Bei einer anderen Gruppe von Heuristiken liegt eine Spezialisierung auf der Änderung der Form oder der Wandstärken. Beispielsweise kann die Struktur geglättet werden, kleine Kammern in der Struktur können detektiert und entfernt werden oder die Wandstärke kann skaliert werden.

In diesem Kapitel werden zunächst die universell einsetzbaren Heuristiken vorgestellt, die von Ortmann und Schumacher (Ortmann 2015; Ortmann und Schumacher 2013; Ortmann et al. 2021) mit dem Fokus auf der Optimierung von Strangpressprofilen entwickelt wurden. Die Heuristiken sind mechanisch so allgemeingültig, dass sie auch für crashbelastete Profilstrukturen aus verbundenen Blechen verwendet werden können. Danach werden die Heuristiken erläutert, die speziell für Profilstrukturen aus verbundenen Blechen entwickelt wurden.

Schneider sowie Sperber haben in ihren Dissertationen Heuristiken für Faserverbundprofile und axial belastete Strangpressprofile entwickelt (Schneider 2023; Sperber 2022). Diese Heuristiken können nicht direkt für lateral belastete Profilstrukturen aus verbundenen Blechen verwendet werden und werden deshalb nicht in dieser Dissertation vorgestellt. Die Existenz dieser Heuristiken wurde der Vollständigkeit wegen erwähnt.

8.1 Universell einsetzbare Heuristiken

Heuristik: Delete Needless Walls (DNW)

Abbildung 8-1 zeigt eine Profilstruktur im undeformierten Zustand (Zeitpunkt $t = 0$), die dann durch einen starren Pfahl deformiert wird (Zeitpunkt $t = t_{end}$). Die Auswertung der inneren Energien zeigt, dass die gestrichelte Wand die geringste Energiedichte aller Wände besitzt. Die Energiedichte einer Wand ergibt sich aus der internen Energie der Wand, dividiert durch ihr Volumen.

Die Heuristik entfernt dann die Wand mit der geringsten Energiedichte der Profilstruktur. Die Energiedichte kann einen Rückschluss auf den strukturmechanischen Nutzen der Wand für die Gesamtstruktur geben. Ein solcher Rückschluss kann nie absolut getroffen werden, da es möglich ist, dass eine Wand eine geringe Energiedichte aufweist, jedoch andere Wände abstützt und somit ein Ausbeulen verhindert (Ortmann et al. 2021).

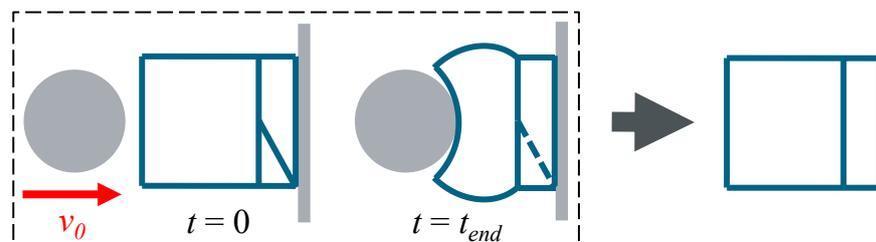


Abbildung 8-1: Prinzip der Heuristik *Delete Needless Walls* (modifiziert nach (Ortmann et al. 2021))

Heuristik: Support Buckling Walls (SBW)

Prinzipiell wird ein möglichst gleichmäßiges Beulen aller Wände einer Profilstruktur angestrebt, da dadurch eine möglichst hohe Energieaufnahme erzielt wird. Um dies zu erreichen, soll ein frühzeitiges Ausbeulen einzelner Wände verhindert werden. Abbildung 8-2 zeigt eine deformierte Profilstruktur mit mehreren ausbeulenden Wänden, wobei die gestrichelte Linie die größte Neigung zum Beulen aufweist.

Diese Heuristik detektiert beulende Wände und stützt die Wand mit der größten Neigung zum Beulen mittig ab, sodass ihre Beullänge halbiert wird. Das Abstützen findet rechtwinklig zur kürzesten Wand statt. Als Maß zur Bewertung der Neigung zum Beulen dient ein von Ortmann entwickelter Beulindex (Ortmann et al. 2021). Der Beulindex b bezieht alle Knotenkombinationen der Knoten N_n einer Wand ein und setzt deren Geschwindigkeitsdifferenz $\Delta v_{n,m,t}$ und Abstand $\Delta d_{n,m}$ für alle Zeitschritte N_t in Relation zueinander:

$$b = \frac{1}{\frac{1}{2}(N_n^2 - N_n) * N_t} * \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{n=1}^{N_n} \sum_{m=n+1}^{N_n} \frac{\Delta v_{n,m,t}^2}{\Delta d_{n,m}} \tag{8-1}$$

Die Geschwindigkeitsdifferenz wird quadratisch bewertet, damit größere, kurzfristige Geschwindigkeitsdifferenzen stärker gewichtet werden (Ortmann et al. 2021). Der resultierende Term wird durch das Produkt der Anzahl an Knotenkombinationen mit der Anzahl der Zeitschritte dividiert.

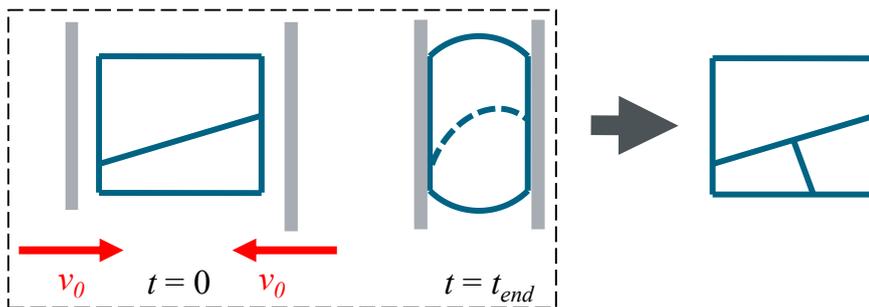


Abbildung 8-2: Prinzip der Heuristik *Support Buckling Walls* (modifiziert nach (Ortmann et al. 2021))

Heuristik: *Balance Energy Density (BED)*

In Abbildung 8-3 ist zu sehen, dass die mit dem Pfahl in Kontakt stehende gestrichelte Wand eine große Deformation erfährt und die größte interne Energie aller Wände aufweist. Da sich die andere gestrichelte Wand an der starren Wand abstützen kann, nimmt sie deutlich weniger interne Energie auf.

Damit alle Wände einen Beitrag bei der Energieaufnahme leisten können, werden die Wände mit der größten und der geringsten Energiedichte mittig miteinander verbunden. Dadurch wird versucht, die weniger verformten Wände besser in den Deformationsprozess miteinzubeziehen und so alle Wände der Struktur zu nutzen.

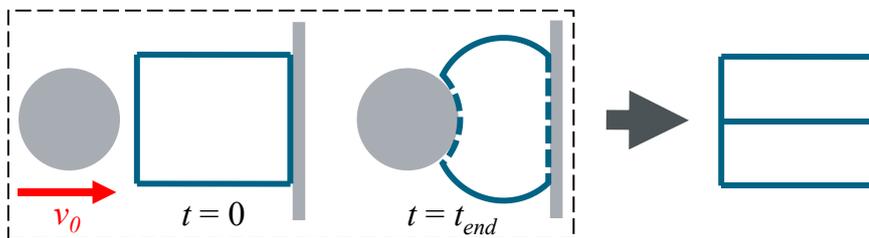


Abbildung 8-3: Prinzip der Heuristik *Balance Energy Density* (modifiziert nach (Ortmann et al. 2021))

Heuristik: Use Deformation Space (UDST/UDSC))

Diese Heuristik detektiert FE-Knoten, die sich maximal voneinander weg- oder aufeinander zubewegen, und verbindet diese Knoten mit einer neuen Wand. Durch diese Vorgehensweise können die Wirkprinzipien von zug- und druckbelasteten Wänden genutzt werden. Daraus resultieren die Heuristiken *Use Deformation Space Tension* (s. Abbildung 8-4 oben) und *Use Deformation Space Compression* (s. Abbildung 8-4 unten).

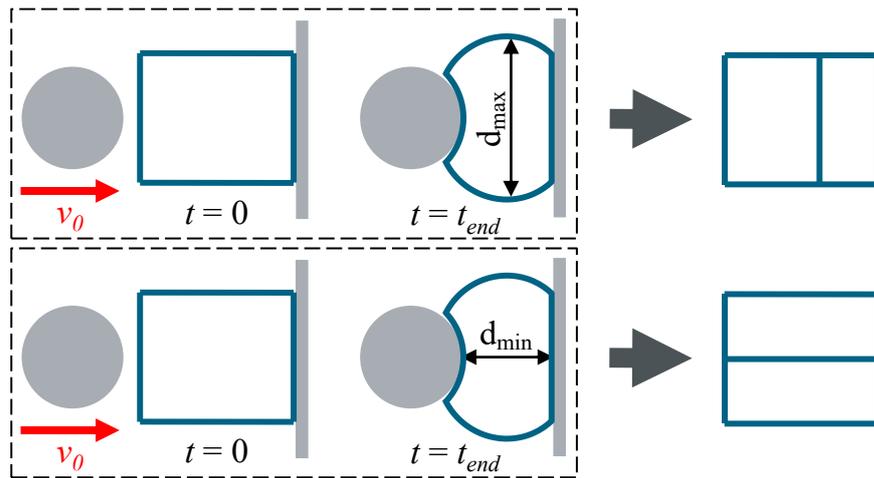


Abbildung 8-4: Prinzip der Heuristik *Use Deformation Space Tension* (oben) und der Heuristik: *Use Deformation Space Compression* (unten) (modifiziert nach (Ortmann et al. 2021))

Die normierte relative Verschiebung $\Delta d_{rel,n,m,t}$ der Knoten n und m zum Zeitpunkt t ergibt sich für die Heuristik *Use Deformation Space Tension* zu:

$$\Delta d_{rel,n,m,t} = \frac{d_{n,m,t} - d_{n,m,t_0}}{(d_{n,m,t_0})^s}. \quad (8-2)$$

Der Term $d_{n,m,t}$ gibt den Abstand der Knoten n und m zum Zeitpunkt t an. Analog dazu gibt d_{n,m,t_0} den Abstand zum Zeitpunkt t_0 an. Der Zeitpunkt t_0 steht für den ersten Zeitschritt der Simulation, also für den Zeitpunkt, zu dem die Struktur undefor-miert ist. Der Exponent s wird in der Konfigurationsdatei festgelegt und dient dazu, die Knotenpaare, die näher zusammen sind, stärker zu gewichten (Ortmann et al. 2021).

Die normierten relativen Verschiebungen werden für die Heuristik „Use Deformation Space Tension“ ermittelt durch:

$$\Delta d_{rel,n,m,t} = \frac{d_{n,m,t_0} - d_{n,m,t}}{(d_{n,m,t_0})^s}. \quad (8-3)$$

Für beide der Heuristiken werden die normierten relativen Verschiebungen der FE-Knotenpaare absteigend sortiert. Ist ein Entwurf mit einer neuen Wand zwischen den Knotenpaaren mit der größten normierten relativen Verschiebung – wegen der Verletzung von Fertigungsrestriktionen – nicht umsetzbar, wird versucht, eine Wand zwischen dem Knotenpaar mit der nächstgrößeren normierten relativen Verschiebung zu erzeugen.

Heuristik: *Remove Small Chambers (RSC)*

Das Ziel dieser Heuristik ist es, kleine Kammern, die aus drei Wänden bestehen, zu detektieren und zu entfernen (s. Abbildung 8-5). Dies geschieht, indem die kürzeste Wand der Kammer entfernt wird und die anderen beiden Wände miteinander verbunden werden (Ortmann et al. 2021). Durch das Entfernen von kleinen Kammern wird die Struktur deutlich vereinfacht. Der Einfluss auf das strukturmechanische Verhalten der Operation wird im Vergleich zum Grad der Vereinfachung als klein erachtet.

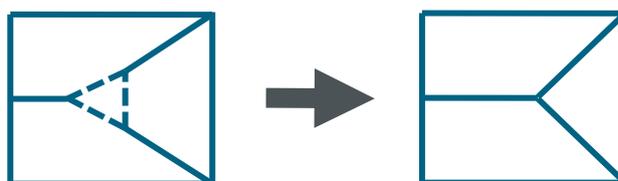


Abbildung 8-5: Prinzip der Heuristik *Remove Small Chambers* (modifiziert nach (Ortmann et al. 2021))

Heuristik: *Support Collapsing Walls (SCW)*

Wenn Materialversagen in der Simulation berücksichtigt wird, kann die Struktur beschädigt werden (s. Abbildung 8-6). Dies äußert sich, indem beispielsweise einzelne Finite Elemente gelöscht werden. Die Strukturschädigung kann sehr lokal eintreten, sich aber auch ausbreiten, sodass Risse entstehen. Dadurch wird die gesamte strukturelle Integrität des Profils beeinträchtigt und eine gleichmäßige Deformation des gesamten Profils, bei dem alle Wände einen Beitrag zur Energieaufnahme leisten, ist nicht mehr möglich. Folglich kann das gesamte Potenzial der Struktur nicht genutzt werden.

Die Heuristik *Support Collapsing Walls* detektiert Materialversagen und stützt die Wand, die das größte Materialversagen in der kürzesten Zeit aufweist, rechtwinklig an der Stelle mit dem größten Materialversagen ab (Ortmann et al. 2021).

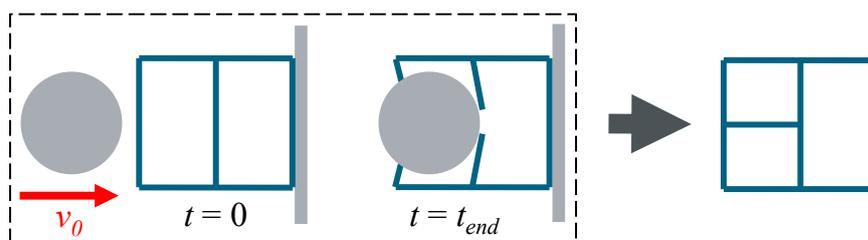


Abbildung 8-6: Prinzip der Heuristik *Support Collapsing Walls* (modifiziert nach (Ortmann et al. 2021))

Heuristik: *Create Lattice Structures* (CLS)

Diese Heuristik erzeugt gitterförmige Strukturen auf Basis des Startentwurfs (s. Abbildung 8-7). Zur Erzeugung von neuen Entwürfen werden keine Simulationsdaten benötigt. Vielmehr wird eine gleichförmige Gitterstruktur mit einer Topologiekategorie erzeugt, die der Topologiekategorie der anderen Entwürfe der aktuellen Iteration entspricht (Ortmann et al. 2021).

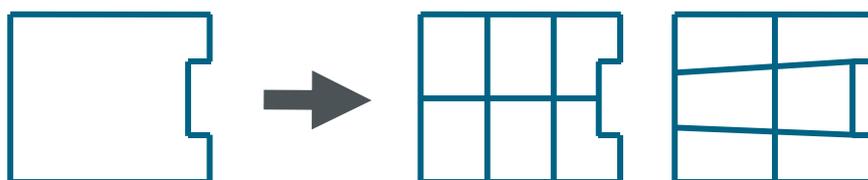


Abbildung 8-7: Prinzip der Heuristik *Create Lattice Structures* (modifiziert nach (Ortmann et al. 2021))

Heuristik: *Smooth Structure* (SS)

Wenn zwei Wände mit einem stumpfen Winkel verbunden sind, werden beide Wände durch eine einzige Wand ersetzt und somit wird die Struktur geglättet (s. Abbildung 8-8). Dies findet nur für Verbindungen statt, an denen zwei Wände aufeinander treffen. Verbindungen von drei oder mehr Wänden bleiben davon unbeeinträchtigt.

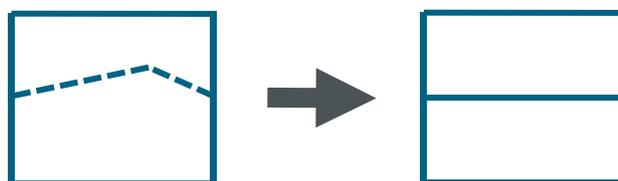


Abbildung 8-8: Prinzip der Heuristik: *Smooth Structure* (modifiziert nach (Ortmann et al. 2021))

Besonders nach dem Entfernen von Wänden aus dem Profilquerschnitt kann ein Glätten der Struktur erforderlich sein. Dies ist der Fall, wenn zum Beispiel die Heuristiken *Delete Needless Walls* und *Remove Small Chambers* angewendet werden (Ortmann et

al. 2021). Die Heuristik *Smooth Structure* wird für jeden Entwurf nach dem Anwenden der Heuristiken zur Topologie- und Formänderung aktiviert.

Heuristik: *Scale Wall Thicknesses (SWT)*

Durch das Einbringen einer Wand mit einer Heuristik wird die Masse des neuen Entwurfs vergrößert. Somit hat im Vergleich zum vorherigen Entwurf nicht nur die Topologieänderung einen Einfluss auf die Veränderung des mechanischen Verhaltens in der Simulation, sondern auch die Erhöhung der Masse.

Um dem entgegen zu wirken, ist es das Ziel dieser Heuristik, die Wandstärken einer Struktur so zu skalieren, dass sie die gleiche Masse aufweist wie die Struktur vor der Topologieänderung durch eine Heuristik (s. Abbildung 8-9). In einer anschließenden Dimensionierung der Wandstärken ist es für den Optimierungsalgorithmus einfacher, das Optimum zu finden.

Die Heuristik *Scale Wall Thicknesses* wird für jeden Entwurf nach dem Anwenden der Heuristiken zur Topologie- und Formänderung aktiviert.

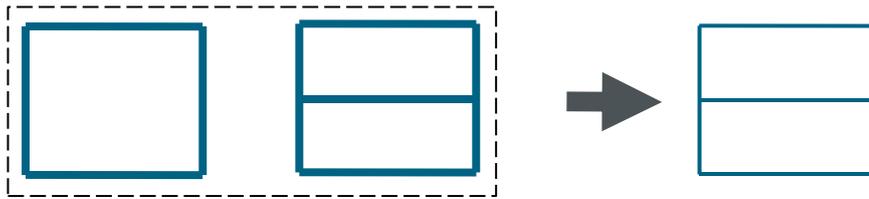


Abbildung 8-9: Prinzip der Heuristik: *Scale Wall Thicknesses* (modifiziert nach (Ortmann et al. 2021))

8.2 Heuristiken speziell für Profile aus verbundenen Blechen

Die im Folgenden vorgestellten Heuristiken zur Topologieänderung verbinden die Verbesserung der strukturmechanischen mit den fertigungstechnischen Eigenschaften der Profilstrukturen. Strukturmechanisch wird auf die bereits bewährte Heuristik *Use Deformation Space* (s. Abschnitt 8.1) aufgebaut, die eine Topologieänderung mit einer neuen Wand vorschlägt, die auf Zug oder Druck belastet ist. Diese Heuristik wird mit fertigungstechnischen Aspekten kombiniert, indem die durch die Topologieänderung erzeugten Entwürfe so angepasst werden, dass die Anzahl an nicht erreichbaren Flanschen reduziert und die Fügbarkeit verbessert wird.

Die drei entwickelten Heuristiken bilden einen gesamten Zyklus bei der Erzeugung von Pfaden ab. Die Heuristik *Start Trapezoid Structure* (s. Abschnitt 8.2.1) gibt einen Impuls, um einen neuen Pfad zu starten, der mit in einen äußeren Flansch integriert wird. Bestehende Pfade werden mit der Heuristik *Continue Trapezoid Structure* weitergeführt (s. Abschnitt 8.2.2) und mit der Heuristik *Connect Inner Structure To Outer*

Flange wird das Ende des Blechs in einen äußeren Flansch integriert (s. Abschnitt 8.2.3).

8.2.1 Heuristik: *Start Trapezoid Structure (STST/STSC)*

Das Ziel dieser Heuristik ist es, eine neue Wand in die Struktur zu integrieren, die ihren Startpunkt in dem nach außen gerichteten Flansch (Customflange) hat. Üblicherweise werden profilartige Bleche in der hier verwendeten Differentialbauweise an ihren beiden freien Enden mit der angrenzenden Struktur gefügt. Da die von dieser Heuristik erzeugte Wand ihren Startpunkt in einem Customflange hat, wird zum Fügen der Wand mit der angrenzenden Struktur nur eine zusätzliche Fügestelle benötigt.

In Abbildung 8-10 sind der undeformierte (Zeitpunkt $t = 0$) und der deformierte (Zeitpunkt $t = t_{End}$) Zustand eines Profils dargestellt. Das Profil wird von einem starren Pfahl eingedrückt und stützt sich seitlich an einer Wand ab.

Die FE-Knoten auf den Customflange-Edges und fixen Customflanges (s. Abschnitt 4.2) dienen als mögliche Startpunkte für eine neue Wand (s. rote Punkte in Abbildung 8-10). Ausgehend von diesen Startpunkten werden mögliche FE-Knoten auf der äußeren Kontur des Profils gesucht, die als mögliche Endpunkte (gelbe Punkte) für die neue Wand dienen können. Die Endpunkte müssen innerhalb eines Bereichs liegen, der durch die angrenzenden Edges am Customflange und den Winkel α definiert ist. Dieser Bereich erstreckt sich ausgehend von jedem Startpunkt in beide Richtungen der dazugehörigen Edge mit dem Winkel α . Durch den Winkel α kann die maximale Neigung der neuen Wand beeinflusst werden. Er wird vom Benutzer in der Konfigurationsdatei definiert. Die in Abbildung 8-10 markierten Endpunkte gehören zu dem mittleren Startpunkt.

Für alle ermittelten Knotenkombinationen, bestehend aus Start- und Endpunkten, werden die normierten relativen Verschiebungen für die Ansätze von zug- und druckbelasteten Wänden ermittelt (s. Formeln 8-2 und 8-3 in Abschnitt 8.1).

Die normierten relativen Verschiebungen werden absteigend sortiert. Ausgehend von dem größten Wert wird versucht, eine neue Wand zwischen dem dazugehörigen Knotenpaar zu erzeugen. Wenn dies wegen der Verletzung von Fertigungsrestriktionen nicht möglich ist, wird eine Wand zwischen dem Knotenpaar mit der nächstgrößten normierten relativen Verschiebung zu erzeugen versucht.

In Abbildung 8-10 werden beide Heuristiken auf einen Entwurf ohne innere Wände angewendet. Diese Heuristiken sind auch bei Entwürfen mit inneren Wänden einsetzbar.

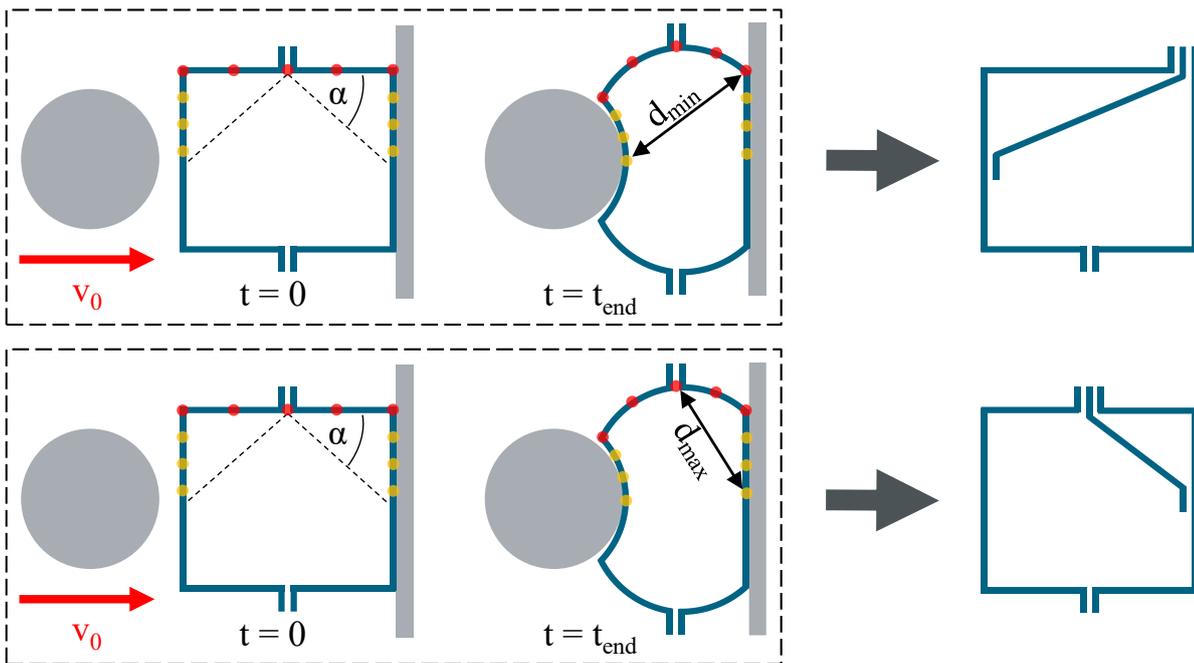


Abbildung 8-10: Prinzip der Heuristiken *Start Trapezoid Structure Tension* (unten) und *Start Trapezoid Structure Compression* (oben) – Startpunkte in Rot, mögliche Endpunkte in Gelb

8.2.2 Heuristik: *Continue Trapezoid Structure (CTST/CTSC)*

Wenn ein neues Blech, bestehend aus einer Wand, in eine Struktur integriert wird, sind in der Regel an beiden Enden des Blechs Fügstellen notwendig, um das Blech mit der angrenzenden Struktur zu verbinden.

Wird jedoch ein bereits bestehender Pfad eines Blechs um eine Wand verlängert, erhöht sich die Anzahl an Fügstellen nur um eins (s. Abbildung 8-11). Die globale Betrachtung des Blechs zeigt, dass die Anzahl der Fügstellen an den Blechenden unverändert bleibt und sich die Anzahl der Fügstellen innerhalb des Pfads um eins erhöht. Dies ist von Vorteil, da sich die Fügstellen innerhalb eines Blechs konstruktiv besser fügen lassen, weil sie im Gegensatz zu den Fügstellen an Blechenden – aufgrund der höheren Steifigkeit – meistens auch mit einseitigem Laserstrahlschweißen gefügt werden können (s. Abschnitt 7.4).

Das Erweitern eines bereits bestehenden Pfads erzeugt eine trapezartige Profilstruktur, bei der die einzelnen Schenkel zwischen anderen Blechen des Profils alternieren. Durch das Erweitern von bereits bestehenden Pfaden können die Gesamtanzahl an Fügstellen und die Zahl an Fügstellen an Blechenden reduziert werden. Dieser fertigungstechnische Ansatz wird mit dem strukturmechanischen Ansatz der Heuristik *Use Deformation Space* kombiniert (s. Abschnitt 8.1).

Die FE-Knoten aller Enden der inneren Pfade dienen als mögliche Startpunkte für eine neue Wand (s. rote Punkte in Abbildung 8-11). Potenzielle Endpunkte für die neue

Wand werden so gewählt, dass der Winkel zwischen der neuen und der letzten Wand im Pfad mindestens so groß wie β ist. Endpunkte, die auf der gleichen Wand liegen wie der Startpunkt, werden nicht berücksichtigt.

Für alle ermittelten Knotenkombinationen von Start- und Endpunkten werden die normierten relativen Verschiebungen bestimmt (s. Formel 8-2 und 8-3 in Abschnitt 8.1). Letztere werden absteigend sortiert. Ausgehend vom größten Wert wird versucht eine neue Wand zwischen dem dazugehörigen Knotenpaar zu erzeugen.

Mit β kann die minimale Neigung der einzelnen Schenkel des Blechs gesteuert werden. Der Winkel β wird vom Benutzer in der Konfigurationsdatei definiert. Für größere Winkel β ist die Chance geringer, Hinterschnitte an den Fügestellen zu erzeugen, wodurch die Fügestellen im Fügeprozess besser erreichbar sind. Für kleinere Winkel kann ein Trapezprofil mit mehr Wänden in dem gleichen Bauraum erzeugt werden.

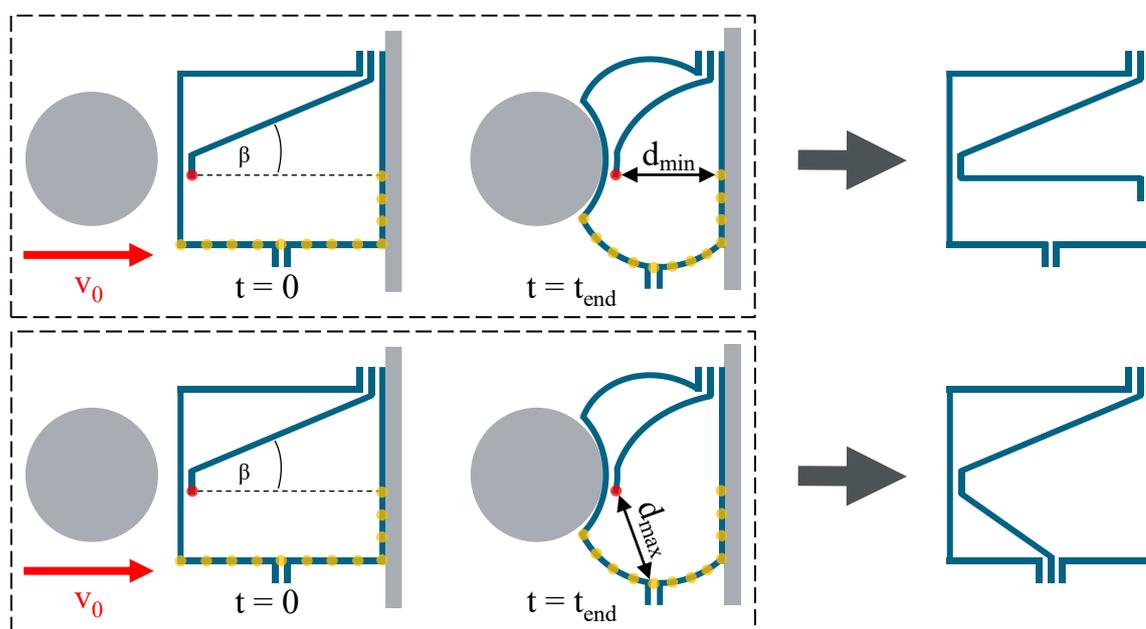


Abbildung 8-11: Prinzip der Heuristiken *Continue Trapezoid Structure Tension* (unten) und *Start Trapezoid Structure Compression* (oben) – Startpunkt in Rot, mögliche Endpunkte in Gelb

8.2.3 Heuristik: *Connect Inner Structure To Outer Flange* (CIOT/CIOC)

Diese Heuristik nutzt den gleichen fertigungstechnischen Ansatz wie *Start Trapezoid Structure* (s. Abschnitt 8.2.1), um die Anzahl der Fügestellen der Struktur zu reduzieren. In Abbildung 8-12 ist ein Profil bestehend aus drei Blechen dargestellt. Das Ziel dieser Heuristik ist es, ein Blech, das im Inneren der Profilstruktur endet und dort gefügt wird, um eine Wand zu erweitern und in einen äußeren Flansch (Customflange) zu integrieren. Durch das Einbringen einer neuen Wand mit dieser Heuristik wird die Anzahl der Fügestellen in der Struktur nicht verändert. Der Flansch am Ende des Pfads

(am roten Punkt) befindet sich nach der Aktivierung der Heuristik innerhalb des Pfads, wodurch er aufgrund der höheren Steifigkeit meistens auch mit einseitigem Laserstrahlschweißen gefügt werden kann (s. Abschnitt 7.4).

Dieser fertigungstechnische Ansatz wird mit dem strukturmechanischen Ansatz der Heuristik *Use Deformation Space* kombiniert (s. Abschnitt 8.1). Alle FE-Knoten der Enden der inneren Pfade dienen als mögliche Startpunkte für eine neue Wand (s. Abbildung 8-12). Potenzielle Endpunkte sind alle FE-Knoten auf Customflange-Edges und fixen Customflanges (s. Abschnitt 4.2). Für alle ermittelten Knotenkombinationen von Start- und Endpunkten werden die normierten relativen Verschiebungen bestimmt (s. Formeln 8-2 und 8-3 in Abschnitt 8.1). Die normierten relativen Verschiebungen werden absteigend sortiert. Ausgehend von dem größten Wert wird versucht, eine neue Wand zwischen dem dazugehörigen Knotenpaar zu erzeugen.

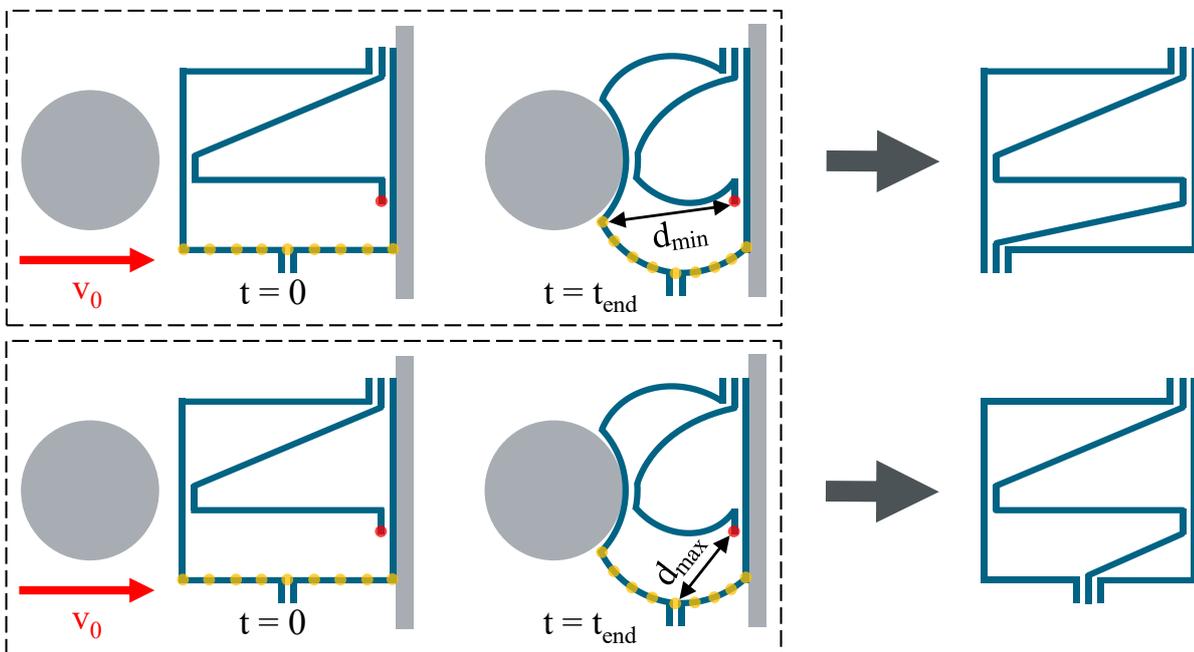


Abbildung 8-12: Prinzip der Heuristiken *Connect Inner Structure To Outer Flange Tension* (unten) und *Connect Inner Structure To Outer Flange Compression* (oben) – Startpunkt in Rot, mögliche Endpunkte in Gelb

9 Optimierungsablauf der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung für Profilstrukturen aus verbundenen Blechen

9.1 Realisierte Optimierungsschleifen

In diesem Kapitel wird der Optimierungsablauf der GHT für Profilstrukturen aus verbundenen Blechen vorgestellt (s. Abbildung 9-1). Als Eingabe wird ein Startentwurf einer Profilstruktur in Form eines Graphen benötigt. Prinzipiell ist es sinnvoll, einen Startentwurf ohne innere Bleche zu verwenden, bei dem sich die äußere Kontur des Profils an den Bauraumgrenzen befindet, weil dem Optimierer dann der größtmögliche Entwurfsraum und die größte Designfreiheit zur Verfügung stehen.

In der äußeren Optimierungsschleife werden die besten N_{cd} Entwürfe der letzten Iteration (in der ersten Iteration wird der Startentwurf verwendet) auf alle N_h Heuristiken zur Topologieänderung angewendet (s. Kapitel 8). Jeder Vorschlag einer Heuristik wird mit den Fertigungsrestriktionen überprüft, sodass nur fertigmache Entwürfe berechnet werden. Die Optimierungsstrategie für *vierversprechende Entwürfe* (VE) macht hier eine Ausnahme (s. Abschnitt 9.3). Sie kann Vorschläge der Heuristiken, die aktuell nicht fertigbar, jedoch vielversprechend sind, unter der Voraussetzung akzeptieren, dass sie in der nächsten Iteration fertigbar werden. Die durch die Heuristiken erzeugte Anzahl neuer Entwürfe der aktuellen Iteration ergibt sich aus dem Produkt der Anzahl der weitergekommenen Entwürfe der letzten Iteration mit der Anzahl aller Heuristiken, sofern jede Heuristik einen fertigbaren Entwurf vorgeschlagen hat. Auf alle diese Entwürfe werden die Heuristiken zur Form- und Wanddickenänderung angewendet.

Im nächsten Schritt werden alle neuen Entwürfe bewertet. Wenn es sich bei dem Optimierungsziel beispielsweise um eine Intrusionsminimierung mit einer Massenrestriktion handelt und es nur eine Entwurfsvariable für die Wandstärken aller Pfade eines Entwurfs gibt, ist ein Funktionsaufruf zur Bewertung jedes Entwurfs ausreichend, da in dem Fall die maximal erlaubte Masse genutzt wird und der Entwurf somit nur mit der daraus resultierenden Wandstärke berechnet werden muss. Wenn es jedoch mehrere voneinander unabhängige Entwurfsvariablen gibt oder das Optimierungsproblem keine Steifigkeitsmaximierung verfolgt, ist eine innere Optimierungsschleife (IOS) mit einer Dimensionierung notwendig (s. Abbildung 9-2). Die IOS aller Entwürfe der aktuellen Iteration können parallel durchgeführt werden. In der IOS kann eine Dimensionierung, Formoptimierung oder beides gemeinsam durchgeführt werden.

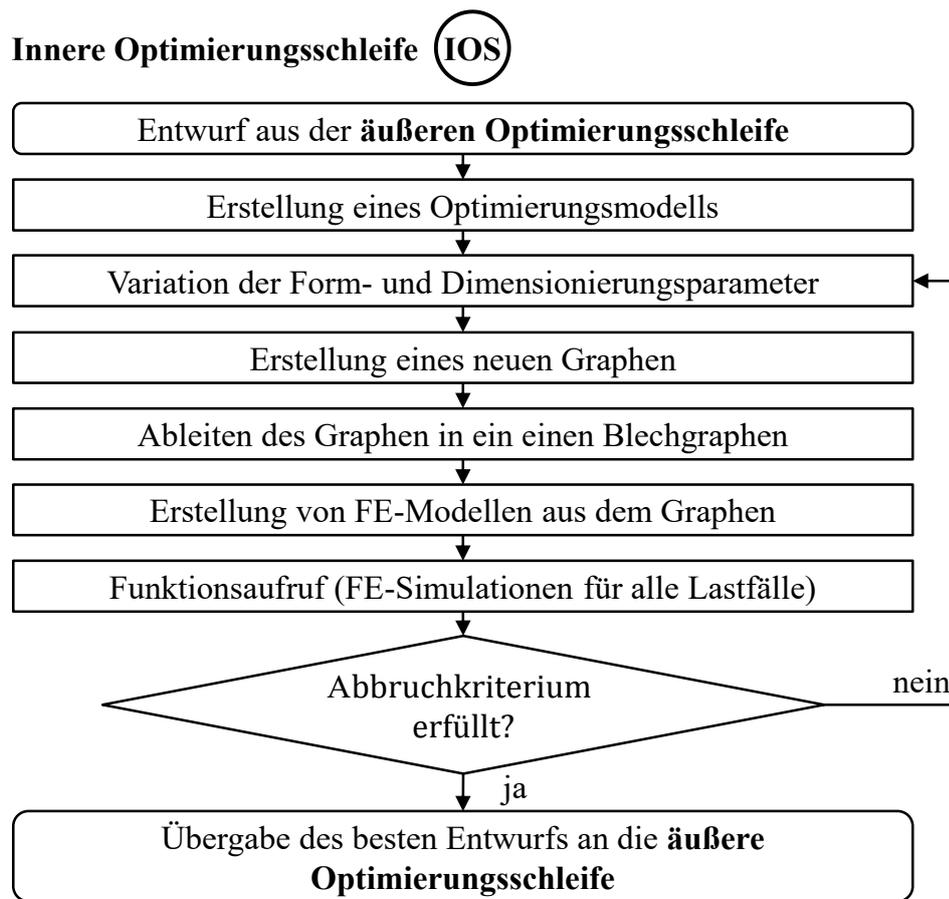


Abbildung 9-2: Innere Optimierungsschleife der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung (modifiziert aus (Ortmann et al. 2021; Sperber 2022))

Die Entwurfsvariablen sind in der Dimensionierung die Wandstärken und in der Formoptimierung die Koordinaten der Vertices. Für die Dimensionierung eines Blechgraphen kann entweder eine Entwurfsvariable für alle Pfade verwendet werden oder jedem Pfad wird eine eigene Entwurfsvariable zugewiesen.

Die zum Optimierungsproblem dazugehörige Eingabedatei für das in Kapitel 2.1 beschriebene Optimierungsprogramm LS-OPT wird automatisiert erzeugt. In dem Optimierungsmodell sind die Zielfunktion, die Restriktionen und die Entwurfsvariablen sowie der gewünschte Optimierungsalgorithmus mit dessen Einstellungen hinterlegt. Die Anzahl an Funktionsaufrufen pro Iteration und die maximale Zahl an Iterationen können vom Benutzer in Abhängigkeit von der Anzahl der Entwurfsvariablen definiert werden.

Für jeden Funktionsaufruf werden die Werte für die Entwurfsvariablen automatisiert im Graphen aktualisiert. Der Graph wird dann in einen Blechgraphen überführt (s. Kapitel 5) und das dazugehörige FE-Modell inklusive Schweißnähten und -punkten (s. Abschnitt 6) wird erzeugt. Im letzten Schritt wird die FE-Simulation durchgeführt.

Ist ein Funktionsaufruf nicht ausreichend zur Bewertung eines Entwurfs, wird eine Formoptimierung und/oder Dimensionierung in der IOS durchgeführt. Dazu werden folgende Einstellungen in LS-OPT (s. Abschnitt 2.1) verwendet:

- Sampling: Space Filling
- Metamodell mit linearen Polynomen
- Optimierungsalgorithmus auf dem Metamodell: Adaptive Simulated Annealing
- Suchalgorithmus: Sequential Response Surface (SRSM)

Wenn das Abbruchkriterium erfüllt ist, stoppt die IOS der GHT und der beste Entwurf der IOS wird an die äußere Optimierungsschleife zurückgegeben. Die besten N_{cd} Entwürfe der aktuellen Iteration werden in die nächste Iteration der äußeren Optimierungsschleife übergeben. Wenn das Abbruchkriterium der äußeren Optimierungsschleife erfüllt ist, kann optional eine IOS mit einer Formoptimierung und Dimensionierung des bisher besten Entwurfs der gesamten Optimierung durchgeführt werden.

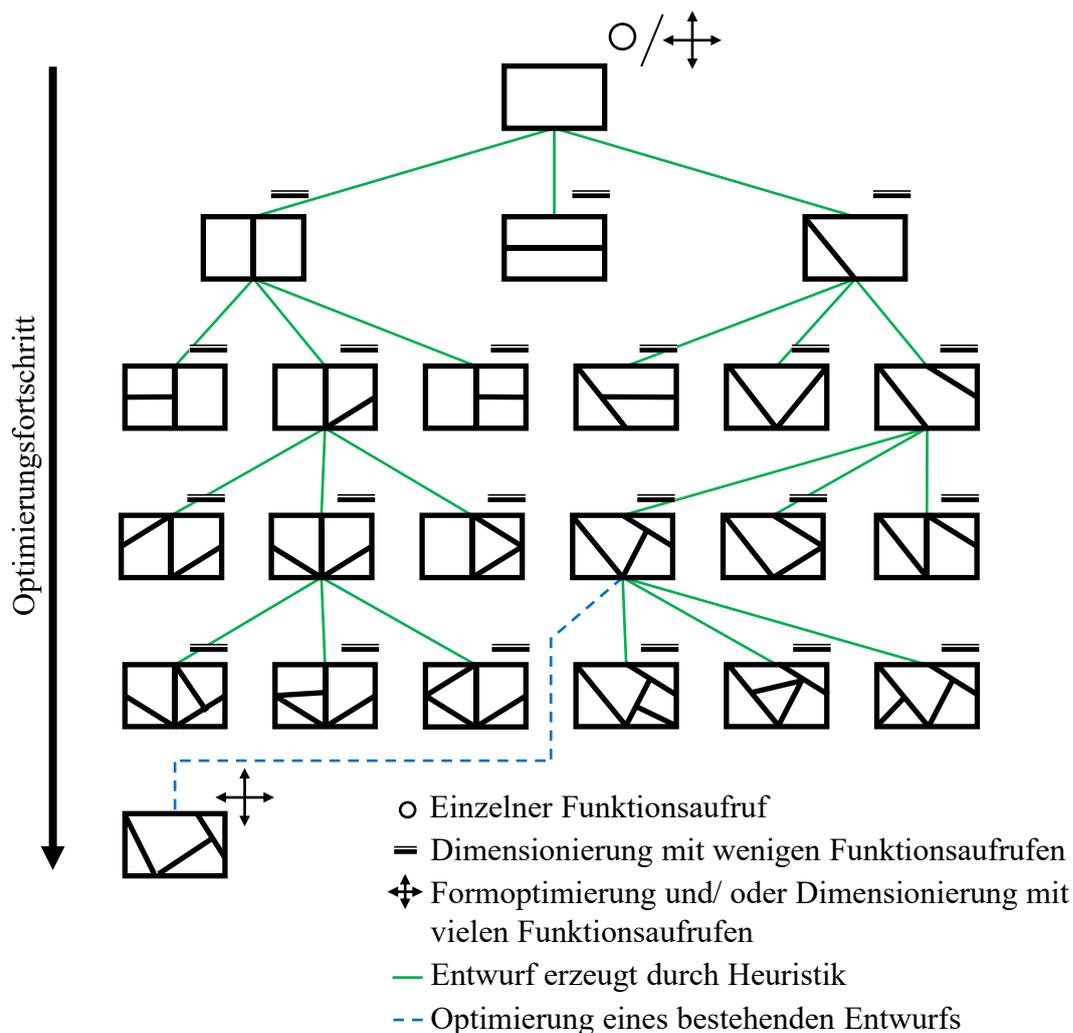


Abbildung 9-3: Beispielhafter Optimierungsbaum der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung (modifiziert nach (Ortmann et al. 2021))

Abbildung 9-3 zeigt beispielhaft einen Optimierungsbaum der GHT. Es wird nur die grundlegende Topologie der Entwürfe ohne Flansche dargestellt, da die Flansche zu klein sind, um sie in der Grafik erkennbar abbilden zu können. In dem Beispiel werden nur drei Heuristiken verwendet und nur die beiden besten Entwürfe werden in die nächste Iteration überführt. Insgesamt werden vier Iterationen mit Topologieänderungen umgesetzt. Danach wird für den besten Entwurf eine Formoptimierung und/oder Dimensionierung durchgeführt.

9.2 Dimensionierung von Profilen aus verbundenen Blechen

Üblicherweise haben Bleche eine gleichmäßige Wandstärke innerhalb einer Platine (Toleranzen vernachlässigt). Eine Ausnahme bilden beispielsweise *Tailored Blanks*, bei denen bewusst unterschiedliche Wandstärken innerhalb einer Platine verwendet werden, um belastungsgerecht im Leichtbau konstruieren zu können. Die Herstellung dieser Bleche ist kostenintensiv und in einer Dimensionierung mit vielen Entwurfsvariablen und somit Funktionsaufrufen verbunden, sodass sie zunächst nicht berücksichtigt werden sollen. Eine Erweiterung der Dimensionierung um Bleche mit unterschiedlichen Wandstärken ist jedoch möglich.

Bei der Dimensionierung einer Profilstruktur, bestehend aus verbundenen Blechen, ist es sinnvoll, jedem Pfad eine eigene Entwurfsvariable zuzuweisen. Diese Option ist neu in der Dimensionierungsstrategie der GHT und wird in diesem Abschnitt vorgestellt. Die in Abbildung 9-4 dargestellte Profilstruktur besteht aus vier einzelnen Blechen, die durch Pfade beschrieben werden. Jedem Pfad wird eine eigene Entwurfsvariable für die Wanddicke zugewiesen, sodass es in der Dimensionierung für diesen Entwurf insgesamt vier Entwurfsvariablen gibt. Die Anzahl an Funktionsaufrufen für jede Iteration in dieser IOS und die Zahl an Iterationen können vom Benutzer in Abhängigkeit von der Anzahl der Entwurfsvariablen in der Konfigurationsdatei festgelegt werden. Standardmäßig werden je Entwurfsvariable zwei Iterationen und zwei Funktionsaufrufe pro Iteration in der IOS durchgeführt. Für diesen Entwurf werden maximal 8 Iterationen mit jeweils 8 Funktionsaufrufen durchlaufen, sodass insgesamt bis zu 64 Funktionsaufrufe in dieser Dimensionierung ausgeführt werden können. Die Funktionsaufrufe einer Iteration können parallel durchgeführt werden.

Als zweite Option kann allen Pfaden die gleiche Wandstärke zugewiesen werden. Dadurch wird die Anzahl an Funktionsaufrufen in der Dimensionierung deutlich reduziert. Für diesen Entwurf mit einer Entwurfsvariablen werden dann nur noch maximal vier Funktionsaufrufe durchgeführt.

Das Bewerten jedes Entwurfs mit einer Entwurfsvariablen für jeden Pfad führt zu einem erhöhten Simulationsaufwand. Bei der Bewertung der von den Heuristiken zur Topologieänderung erzeugten Entwürfe wird empfohlen, nur eine Entwurfsvariable bzw. Wanddicke zu verwenden. In einer finalen Dimensionierung am Ende der gesamten Optimierung kann dann für jeden Pfad eine eigene Entwurfsvariable genutzt werden.

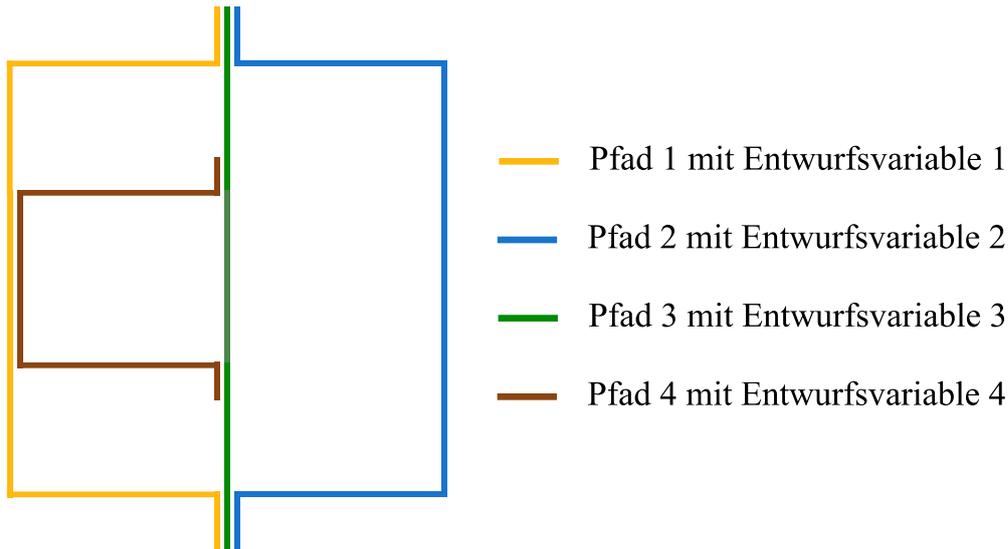


Abbildung 9-4: Entwurfsvariablen bei der Dimensionierung von Blechen

9.3 Optimierungsstrategie für vielversprechende Entwürfe (*Promising Designs*)

In Abbildung 9-5 sind ein Entwurf und seine mögliche Topologieänderung durch eine Heuristik dargestellt. Bei der Überprüfung des neuen Entwurfs mit den Fertigungsrestriktionen wird festgestellt, dass es keine Fügereihenfolge gibt, mit der alle Pfade miteinander gefügt werden können. Durch das Fügen von Pfad 3 mit Pfad 1 kann im Anschluss die Schweißverbindung von Pfad 2 mit Pfad 3 nicht mehr erzeugt werden, weil es keinen beidseitigen Zugang zu der Fügestelle gibt. Ein Fügen mit einseitigem Laserstrahlschweißen ist auch nicht möglich, da die Steifigkeit des Flansches nicht ausreichend ist und somit der Kontakt zwischen den Fügepartnern nicht sichergestellt ist (s. Abschnitt 7.4). Prinzipiell sind Entwürfe mit einem inneren Pfad nicht ffügbar, wenn beide Enden des Pfads mit unterschiedlichen Pfaden der äußeren Struktur gefügt werden, da nicht alle Fügstellen erreicht werden können. Eine Ausnahme stellt ein innerer Pfad dar, der in einen äußeren Flansch integriert ist.

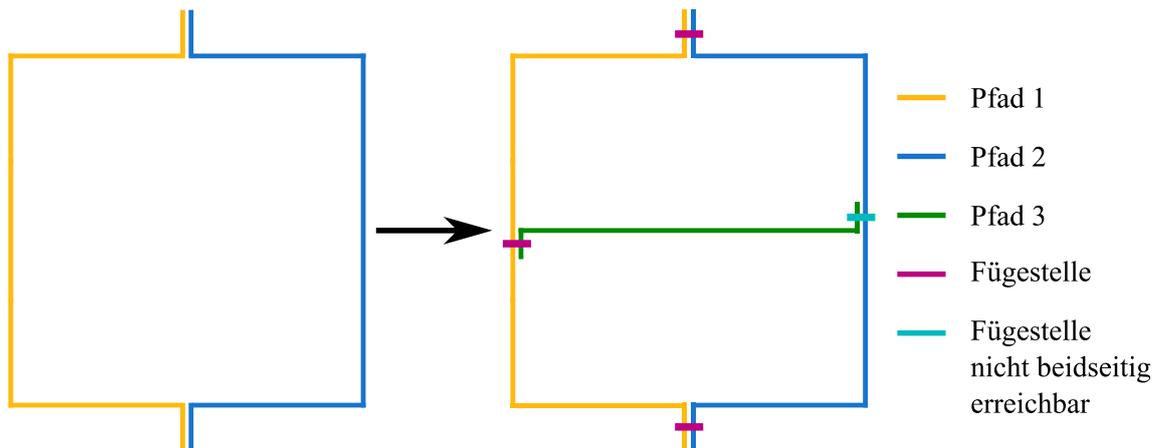


Abbildung 9-5: Topologiemodifikation führt zu nicht fügbarem Entwurf

In Abbildung 9-6 ist ein nicht fertigbarer Entwurf dargestellt, der durch eine Topologieänderung mit einer Heuristik wieder fertigbar wird. Die Fügereihenfolge sieht vor, dass zunächst Pfad 2 mit Pfad 3 an zwei Fugestellen verschweißt wird. Danach können Pfad 1 und Pfad 2 miteinander gefügt werden. Zuletzt kann Pfad 1 mit Pfad 3 durch Laserstrahldurchschweißen gefügt werden. Dieses Beispiel zeigt, dass nicht fügbare Entwürfe durch eine sinnvolle Topologiemodifikation wieder fügbare werden können. Es ist jedoch auch möglich, dass fügbare Entwürfe durch eine Topologiemodifikation nicht fügbare werden.

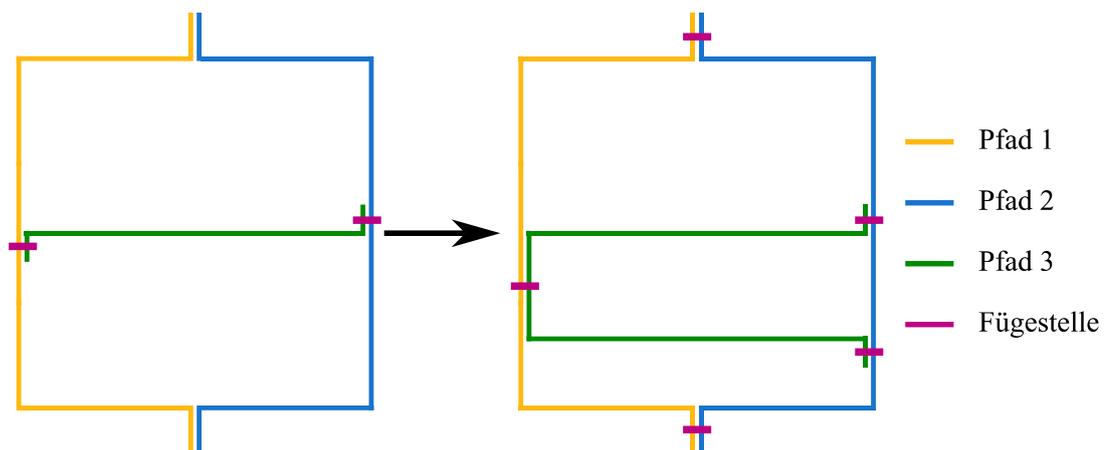


Abbildung 9-6: Topologiemodifikation führt zu fügbarem Entwurf

Der ursprüngliche Ablauf der GHT schränkt den Entwurfsraum durch das iterative Einbringen von einzelnen Wänden und das dadurch verbundene Aussortieren vermeintlicher nicht fertigbarer Entwürfe stark ein. Aus diesem Grund wurde eine Strategie entwickelt, mit der dieser Herausforderung begegnet wird.

Das Vorgehen, mehrere Wände pro Iteration in die Struktur zu integrieren (zum Beispiel Hutprofile), um die Fügbarkeit sicherzustellen, wird nicht als zielführend erachtet, da dadurch die Vergleichbarkeit mit Entwürfen, die eine andere Topologiekategorie besitzen, nicht mehr gegeben ist. Um eine Vergleichbarkeit zu schaffen, müssten alle Heuristiken zwei Wände integrieren oder die Heuristiken, die zwei Wände integrieren, dürften erst mit den Entwürfen der darauffolgenden Iteration verglichen werden. Durch das simultane Einbringen von zwei Wänden in die Struktur ändert sich deren strukturelles Verhalten deutlich stärker als beim Einbringen einer Wand. Dadurch können die strukturellen Ansätze, die die Heuristiken verfolgen, gegebenenfalls nicht mehr komplett ausgeschöpft werden und die Leistungsfähigkeit der Heuristiken könnte reduziert werden. Dies hätte eine Verringerung des Optimierungspotenzials zur Folge. Diese Strategie wird zum jetzigen Zeitpunkt als nicht zielführend erachtet.

Der entwickelte Ablauf der Optimierungsstrategie für vielversprechende Entwürfe aus verbundenen Blechen ist in Abbildung 9-7 dargestellt. Im Optimierungsablauf der GHT erzeugt jede Heuristik eine Topologiemodifikation für jeden Entwurf. In der Topologiemodifikation einer Heuristik wird mit der topologischen Änderung begonnen, die das größte Verbesserungspotenzial verspricht. Wenn eine Topologiemodifikation die Fertigungsrestriktionen (s. Kapitel 6) nicht erfüllt, wird die Topologiemodifikation mit dem nächstgrößten Verbesserungspotenzial verwendet. Sobald ein Entwurf nur die Fertigungsrestriktion zum Fügen der Struktur nicht erfüllt, wird die Methode für *vielversprechende Entwürfe* aktiviert. Mit dieser werden die nicht fügbaren Vorschläge der Heuristik analysiert und die Fügbarkeit des Entwurfs durch mögliche Topologiemodifikationen in der nächsten Iteration wird abgeschätzt. Wenn für einen Entwurf eine positive Fügbarkeit für die nächste Iteration prognostiziert wird und er gleichzeitig alle anderen Fertigungsrestriktionen erfüllt, bekommt er den Status *Promising* (vielversprechend). Ein vielversprechender Entwurf hat dann die Möglichkeit, in der nächsten Iteration alle Fertigungsrestriktionen inklusive die der Fügbarkeit zu erfüllen. Gelingt ihm dies nicht, wird der Entwurf verworfen. Die Nachkommen eines Entwurfs können also nicht als *Promising* deklariert werden, sofern der Elternentwurf *Promising* ist. Dadurch wird sichergestellt, dass die Entwürfe tatsächlich wieder fügbar werden und nicht zu viele Entwürfe einer Iteration vorübergehend nicht fügbar sind. Sobald ein *Promising*-Entwurf wieder vollständig fertigbar ist, können seine Nachkommen wieder den Status *Promising* erlangen.

Der Algorithmus zum Erkennen von vielversprechenden Entwürfen kann beliebig erweitert werden. Aktuell wird der Pfad eines Trapezprofils erkannt, das zwischen mehreren äußeren Edges alterniert (s. Abbildung 9-5 und Abbildung 9-6). In der nächsten

Iteration kann der Entwurf durch das Einbringen einer neuen Wand am Pfadende wiederfügbar werden.

Optimierungsstrategie für vielversprechende Entwürfe (VE)

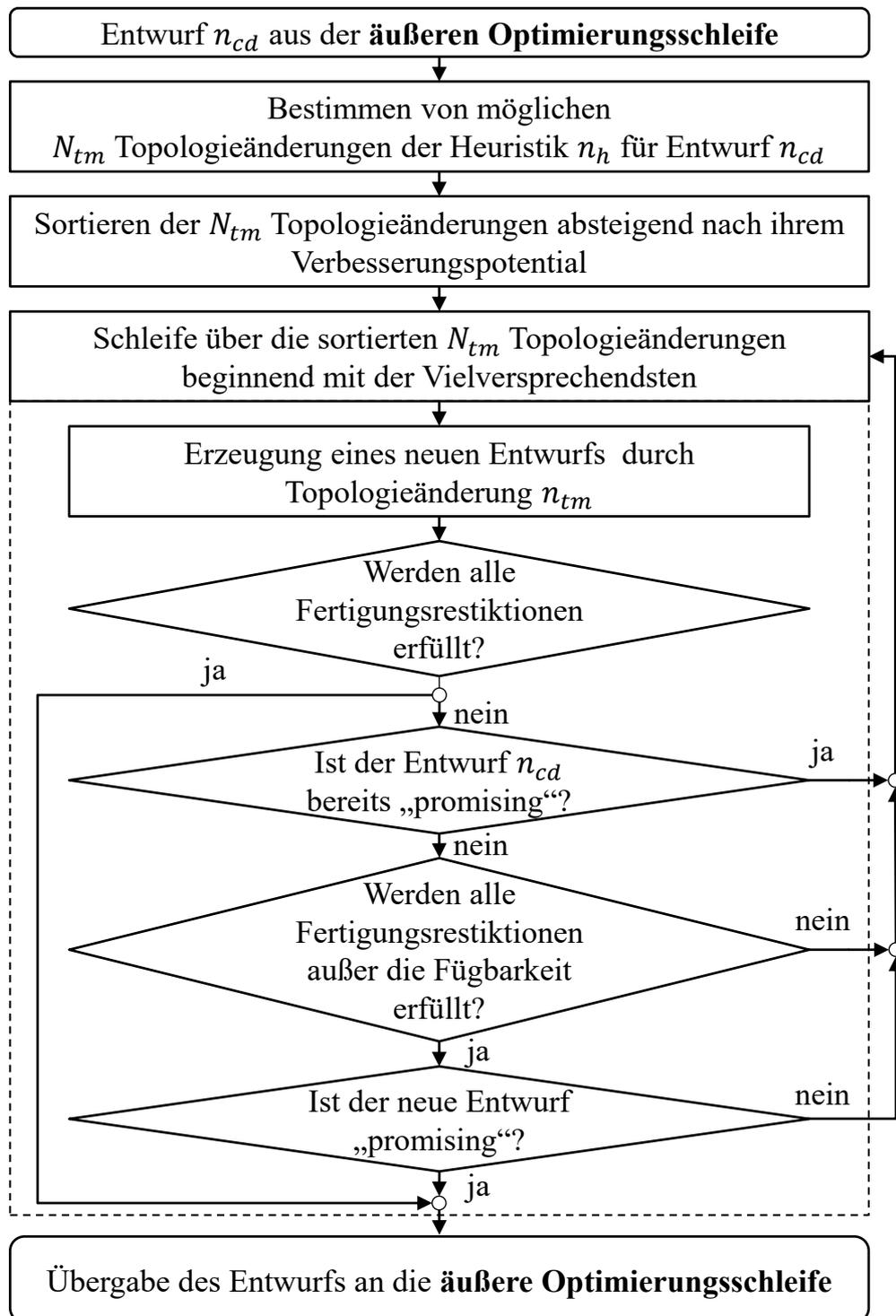


Abbildung 9-7: Optimierungsstrategie für vielversprechende Entwürfe (VE) bei der Topologiemodifikation mit Heuristiken

10 Darstellung der Effizienz der Methode anhand praktischer Anwendungen

10.1 Anwendungsbeispiel: Schweller im seitlichen Pfahlaufprall

Das Anwendungsbeispiel besteht aus einem Teil eines Seitenschwellers, der sich mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 32 km/h in Richtung eines starren Pfahls mit einem Durchmesser von 255 mm bewegt, und ist an den Lastfall eines seitlichen Pfahlaufpralls eines Personenkraftfahrzeugs nach Euro NCAP (EURO NCAP 2024) angelehnt (s. Abbildung 10-1). Euro NCAP ist eine Gesellschaft, die unabhängige Bewertungen der Fahrzeugsicherheit durchführt. Die Länge des Seitenschwellers beträgt 600 mm und die Blechdicke 6,8 mm, sodass sich eine Masse von 6,719 kg für den Seitenschweller ergibt. Die Blechdicke des Seitenschwellers ist zu groß für das Punktschweißen; dementsprechend soll er auch in dieser Ausführung nicht hergestellt werden, sondern diene lediglich als Startentwurf für die Optimierung. Die Blechdicke wurde bewusst so gewählt, damit eine Vergleichbarkeit einer Optimierung dieses Modells mit dem Fertigungsverfahren Strangpressen von Ortmann et al. (2021) möglich ist. Die in der Optimierung entstehenden Entwürfe werden aufgrund der Topologiemodifikationen geringere Blechdicken aufweisen, die ffügbar sind.

Der Seitenschweller besteht aus zwei Blechen, die an den Flanschen mit Schweißpunkten über die gesamte Länge des Seitenschwellers in einem Abstand von 30 mm zwischen den Schweißpunkten (rot markiert) miteinander verbunden sind. Die Festigkeit der Schweißpunkte wurde auf Basis der Blechdicken berechnet und beträgt für die Kopfzugkraft 72,2 kN und für die Scherzugkraft 34,6 kN (s. Kapitel 6). In der Mitte des Seitenschwellers ist ein Teil eines Sitzquerträgers befestigt. An dem freien Ende des Sitzquerträgers wurde eine schiebende Masse von 300 kg angebracht, um die kinetische Energie des Systems zu erhöhen und somit die Deformationen eines realistischen Seitenaufprallszenarios eines Gesamtfahrzeugs darzustellen. Bis auf die y-Translation wurden alle Translationen und Rotationen der letzten FE-Knoten-Reihe am freien Ende des Sitzquerträgers gesperrt.

Das Modell ist mit Belytschko-Tsay-Schalenelementen mit einer Elementkantenlänge von 5 mm und 5 Integrationspunkten über die Dicke vernetzt. Als Material für den Seitenschweller und Sitzquerträger wird eine AA6XXX Aluminiumlegierung mit einer Streckgrenze von 280 MPa verwendet (Ortmann et al. 2021). Es wurde ein elastisch-plastisches Materialmodell mit Hill-Stören-Rice Kriterium zur Elementlöschung genutzt. Zur Berechnung des Modells wurde der Crash-Solver Pam-Crash verwendet.

Die Simulation wurde terminiert sobald die schiebende Masse komplett abgebremst wurde.

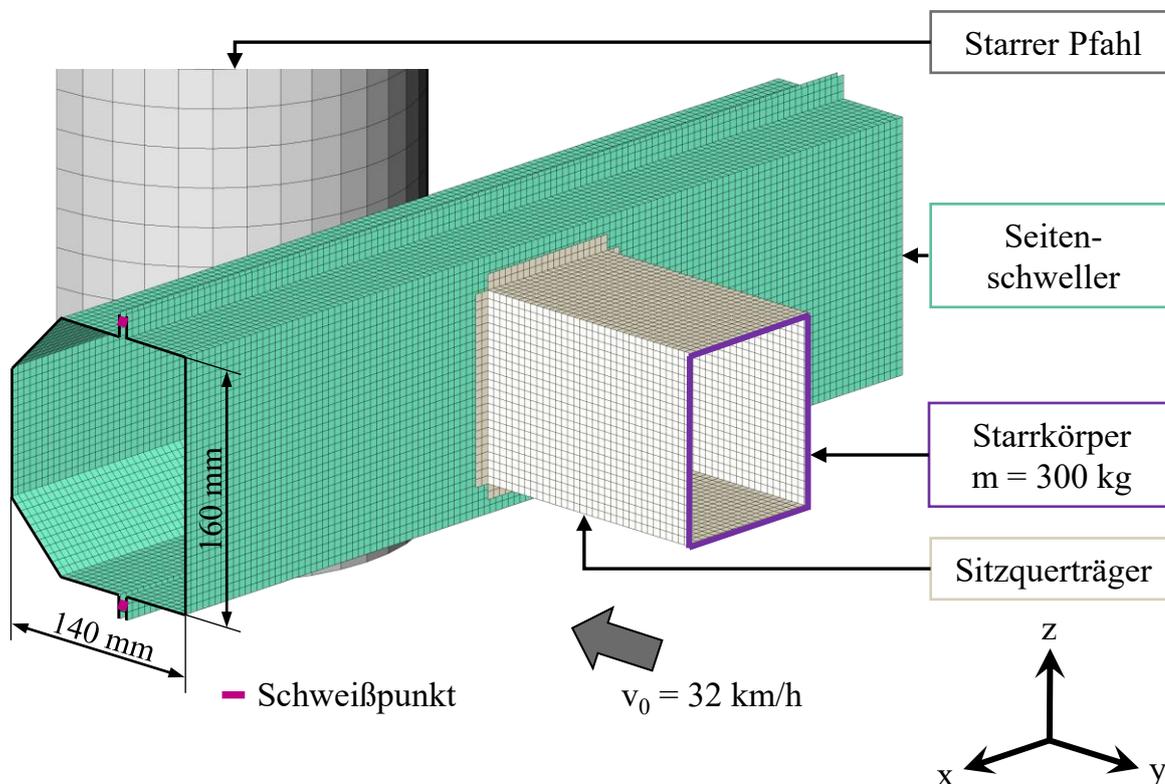


Abbildung 10-1: Anwendungsbeispiel – Seitenschweller im seitlichen Pfahlaufprall (modifiziert nach Ortmann et al. 2021)

Abbildung 10-2 zeigt den undeformierten Zustand und den Zustand der maximalen Deformation des Seitenschwellers in der Seitenansicht. Der Seitenschweller wurde zu diesem Zeitpunkt komplett abgebremst und die Rückfederung aufgrund der elastischen Deformation setzte ein. Durch das Schieben des Sitzquerträgers in den Seitenschweller kam es an den Kontaktstellen zwischen den Ecken des Sitzquerträgers und des Seitenschwellers zu Materialversagen und Elementlöschungen. Die Schweißpunkte des Seitenschwellers blieben vollständig intakt.

Zwischen dem Seitenschweller und dem starren Pfahl wurde die Kontaktkraft gemessen. Die Intrusion (Eindrückung) des Pfahls in den Schweller ist in Abhängigkeit von der Kontaktkraft in Abbildung 10-3 dargestellt. Die Kontaktkraft wurde mit einem CFC600-Filter geglättet (Alem und Perry 1995). Zu Beginn der Simulation stieg das Kraftniveau auf 90 kN bis 100 kN an und wurde bis zu einer Intrusion von ca. 40 mm auf diesem Niveau gehalten. Nachdem der Pfahl den Seitenschweller 40 mm intrudiert hatte, begann der Kontakt der oberen, nichtschrägen Struktur des Schwellers mit dem Pfahl. Dadurch stieg das Kraftniveau bis zu dem Maximum von 196,4 kN an. Das Materialversagen und die Elementlöschungen an den Kontaktstellen zwischen dem

Seitenschweller und dem Sitzquerträger sorgten für eine lokale Schwächung der Struktur, wodurch die Kraft ab einer Intrusion von 80 mm stark abfiel.

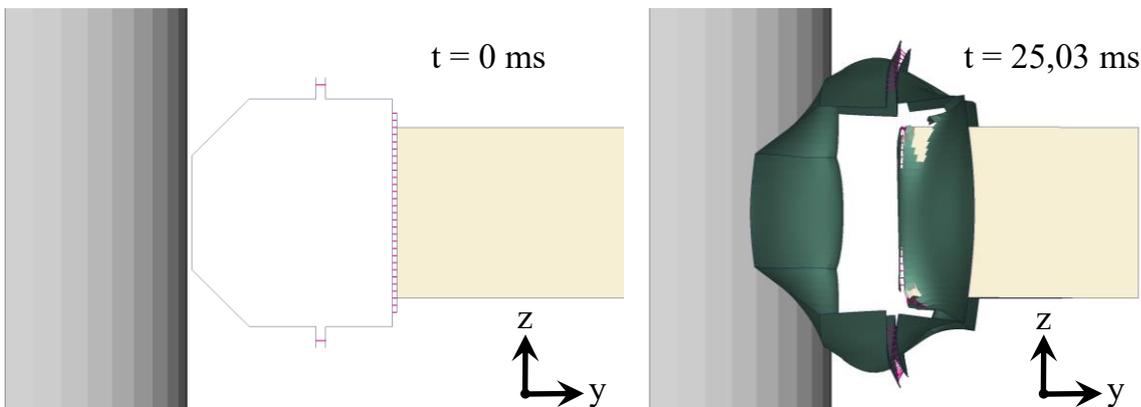


Abbildung 10-2: Undeformierter (links) und maximal deformierter (rechts) Zustand des Anwendungsbeispiels aus Abbildung 10-1 in der Seitenansicht

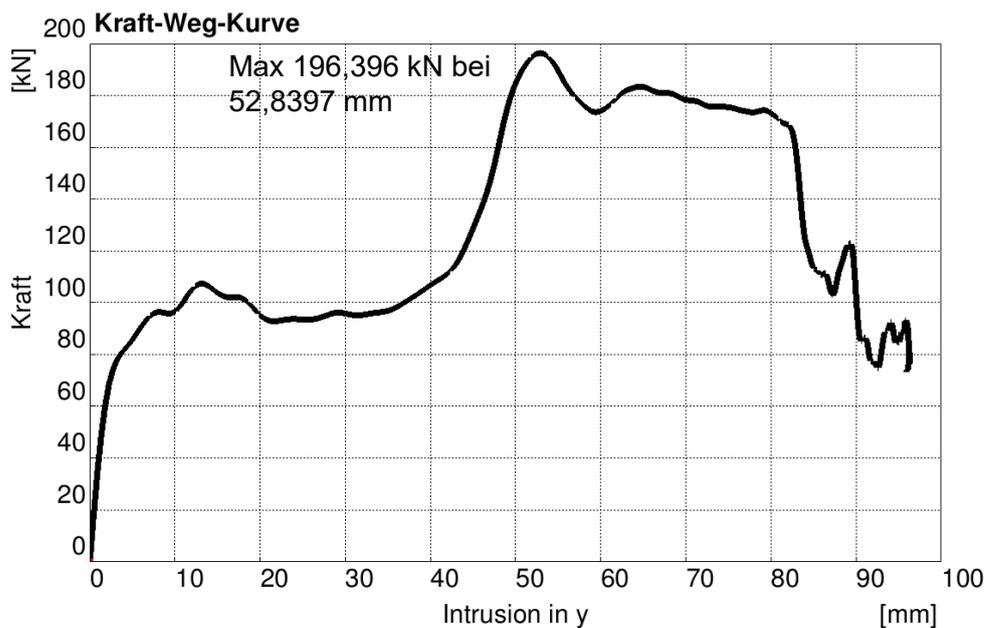


Abbildung 10-3: Kraft(CFC600)-Intrusions-Kurve des Anwendungsbeispiels

10.2 Minimierung der maximalen Kontaktkraft

Als Simulationsmodell für die Optimierung wird das Anwendungsbeispiel aus Abschnitt 10.1 verwendet, das einen Seitenschweller im seitlichen Pfahlaufprall darstellt. Das Ziel der Optimierung ist die Minimierung der maximalen Kontaktkraft zwischen dem Seitenschweller und dem Pfahl. Die Restriktion ist die Intrusion des Pfahls in den Schweller, die maximal 100 mm betragen darf und somit ungefähr der Intrusion des Startentwurfs entspricht.

Die zu optimierende Geometrie ist der Querschnitt des Seitenschwellers, dessen äußere Kontur fix ist. Es wurde zu keiner Zeit eine Formoptimierung durchgeführt.

Um den Einfluss der neu entwickelten Methodik inklusive Fertigungsrestriktionen zu zeigen, wurden Optimierungen mit unterschiedlichen Einstellungen durchgeführt (s. Tabelle 10-1). Alle Optimierungen berücksichtigen das Fügekonzept 3 aus Abschnitt 7.5, es sind also das Punktschweißen und das Laserstrahlschweißen aktiv. Die Fertigungsrestriktionen für das Biegeumformen sind in den Optimierungen A und B aktiv. In Optimierung C sind die Fertigungsrestriktionen für das Biegeumformen inaktiv.

In den Optimierungen A und C wurden für die Bewertung der Entwürfe die Dimensionierungen mit einer Entwurfsvariable für die Blechdicke des gesamten Profils durchgeführt. Dazu wurden maximal 6 Funktionsaufrufe pro Entwurf genutzt. In Optimierung B wurde in der Dimensionierung der Entwürfe jeweils eine Entwurfsvariable für die Blechdicke jedes Blechs des Profils verwendet. Für jede Entwurfsvariable wurden dafür zwei Iterationen und zwei Funktionsaufrufe pro Iteration durchgeführt. Die Blechdicken können in der Dimensionierung kontinuierlich zwischen 0,5 mm und 5,0 mm verändert werden. Die kontinuierlichen Blechdicken müssen nach der Optimierung in diskrete Blechdicken überführt werden. Dazu ist eine erneute Simulation notwendig um die Ergebnisse zu validieren.

Tabelle 10-1: Unterschiedliche Einstellungen der Fertigungsrestriktionen und der Dimensionierung der Optimierungen in den Abschnitten 10.2.1 bis 10.2.3

Name	Fertigungsrestriktionen			Dimensionierung
	Punkt-schweißen	Laserstrahl-schweißen	Biegeum-formen	
Optimierung A	aktiv	aktiv	aktiv	Eine Blechdicke pro Profil
Optimierung B	aktiv	aktiv	aktiv	Eine Blechdicke pro Blech
Optimierung C	aktiv	aktiv	inaktiv	Eine Blechdicke pro Profil

Das Optimierungsproblem und die Optimierungseinstellungen für die Optimierungen A, B und C sind in Tabelle 10-2 zusammengefasst. Für das Punktschweißen ist ein maximaler Neigungswinkel von 5° und für das Laserstrahlschweißen einer von 45° , abweichend von der Senkrechten zur Fügestelle, zulässig. An den Fügstellen an den

Enden der Bleche der äußeren Struktur sind maximal vier Bleche pro Fügestelle erlaubt. An allen anderen Fügstellen sind maximal drei Bleche pro Fügestelle zulässig. Die Optimierung stoppt, sobald in einer Iteration keine Verbesserung erzielt wird.

Tabelle 10-2: Beschreibung der Aufgabe für die Optimierungen A, B und C: Minimierung der maximalen Kontaktkraft

Zielfunktion	Minimierung der maximalen gefilterten (CFC 600) Kontaktkraft zwischen Seitenschweller und Pfahl
Restriktion	Intrusion des Seitenschwellers (y-Richtung) ≤ 100 mm
Fertigungsrestriktionen	<ul style="list-style-type: none"> • Verbindungswinkel zwischen zwei Wänden $\geq 15^\circ$ • Abstand zweier Wände ≥ 15 mm • $0,5$ mm \leq Blechdicke $\leq 5,0$ mm • Verbinden von Blechpfaden ≤ 75 mm • Check für Biegeumformung: aktiv • Check zum Widerstandspunktschweißen: Platzbedarf von 10 mm für die Elektrode mit Neigungswinkel $\alpha \leq 5^\circ$ • Check zum Laserstrahlschweißen: Platzbedarf von 10 mm für Laser und Fixierung mit Neigungswinkel $\beta \leq 45^\circ$ • Anzahl an Blechen pro Fügestelle für äußere Fügstellen ≤ 4 • Anzahl an Blechen pro Fügestelle für innere Fügstellen ≤ 3
Fügeparameter	<ul style="list-style-type: none"> • Flanschüberlappung = 15 mm • Schweißpunktstand = 30 mm • Fügespalt = 0,2 mm • Festigkeiten der Schweißpunkte und Schweißnähte in Abhängigkeit von den Blechpaarungen am Flansch (s. Kapitel 6)
Einstellungen	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensionierung (s. Kapitel 9) für Optimierung A und C mit einer Blechdicke für alle Bleche • Dimensionierung für Optimierung B mit einer eigenen Blechdicke für jedes Blech • Optimierungsstrategie <i>vielversprechende Entwürfe</i> ist aktiv (s. Abschnitt 9.3) • Abbruchkriterium: Eine Iteration ohne Verbesserung • Anzahl konkurrierender Entwürfe $N_{cd} = 5$

10.2.1 Optimierung A: Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen für das Fügen und Biegeumformen

Abbildung 10-4 zeigt die Profilquerschnitte der besten drei Entwürfe für jede Iteration bis zum Erreichen des besten Entwurfs in Iteration 4. Beginnend mit einer Kontaktkraft von 196,4 kN für den Startentwurf wird die Kontaktkraft in jeder Iteration reduziert. Der beste Entwurf von Optimierung A wurde in Iteration 4 gefunden und hat eine maximale Kontaktkraft von 139,9 kN. Der Name jedes Entwurfs ist eine Aneinanderreihung der Abkürzungen der Heuristiken, die bislang auf den Entwurf und seine Eltern angewendet wurden. Die zu den Abkürzungen gehörigen Heuristiken werden in Kapitel 8 vorgestellt.

Die beiden besten Entwürfe in Iteration 2 sind nicht fertigbar, da die inneren Wände im Zusammenbau mit jeweils zwei unterschiedlichen Blechen gefügt werden müssen und die beidseitige Zugänglichkeit für die Fügwerkzeuge zu den Flanschen deswegen nicht möglich ist. Die Optimierungsstrategie für *vielversprechende Entwürfe* ermöglicht, es diese Entwürfe mit in die nächste Iteration zu überführen, obwohl sie nicht fertigbar sind (s. Abschnitt 9.3). Dadurch können sie in der nächsten Iteration durch eine Änderung der Topologie fertigbar werden. Gelingt dies nicht, werden sie verworfen. Die anderen Entwürfe in Abbildung 10-4 erfüllen die Fertigungsrestriktionen. Alle gezeigten Entwürfe halten die Intrusionsrestriktion ein. In der Optimierung wurden 111 unterschiedliche Entwürfe mit insgesamt 667 Funktionsaufrufen untersucht.

Die Optimierungshistorie vom besten Entwurf zeigt Abbildung 10-5. Daraus ist ersichtlich wie die Topologiemodifikationen iterativ durchgeführt werden und der beste Entwurf der Optimierung entsteht. Der beste Entwurf besteht aus zwei inneren und zwei äußeren Blechen. Die beiden äußeren Bleche bilden die äußere Schale des Profils. Die inneren Bleche bestehen aus einem ebenen Blech mit abgewinkelten Flanschen und einem schmalen Hutprofil. Die Fügstellen der Bleche sind in Abbildung 10-6 im undeformierten Zustand sichtbar (Simulationszeitpunkt $t = 0$ ms). In dem Deformationsbild (Simulationszeitpunkt $t = 23,75$ ms) ist ersichtlich, dass das Materialversagen und die Elementlöschungen an den Kontaktstellen zwischen dem Seitenschweller und dem Sitzquerträger deutlich geringer sind als beim Startentwurf (s. Abbildung 10-2). Dies liegt daran, dass das innere Hutprofil den Sitzquerträger abstützt und somit die Belastung an der Verbindungsstelle zwischen dem Seitenschweller und dem Sitzquerträger reduziert. Die Fügstellen des Seitenschwellers sind intakt und zeigen kein Versagen.

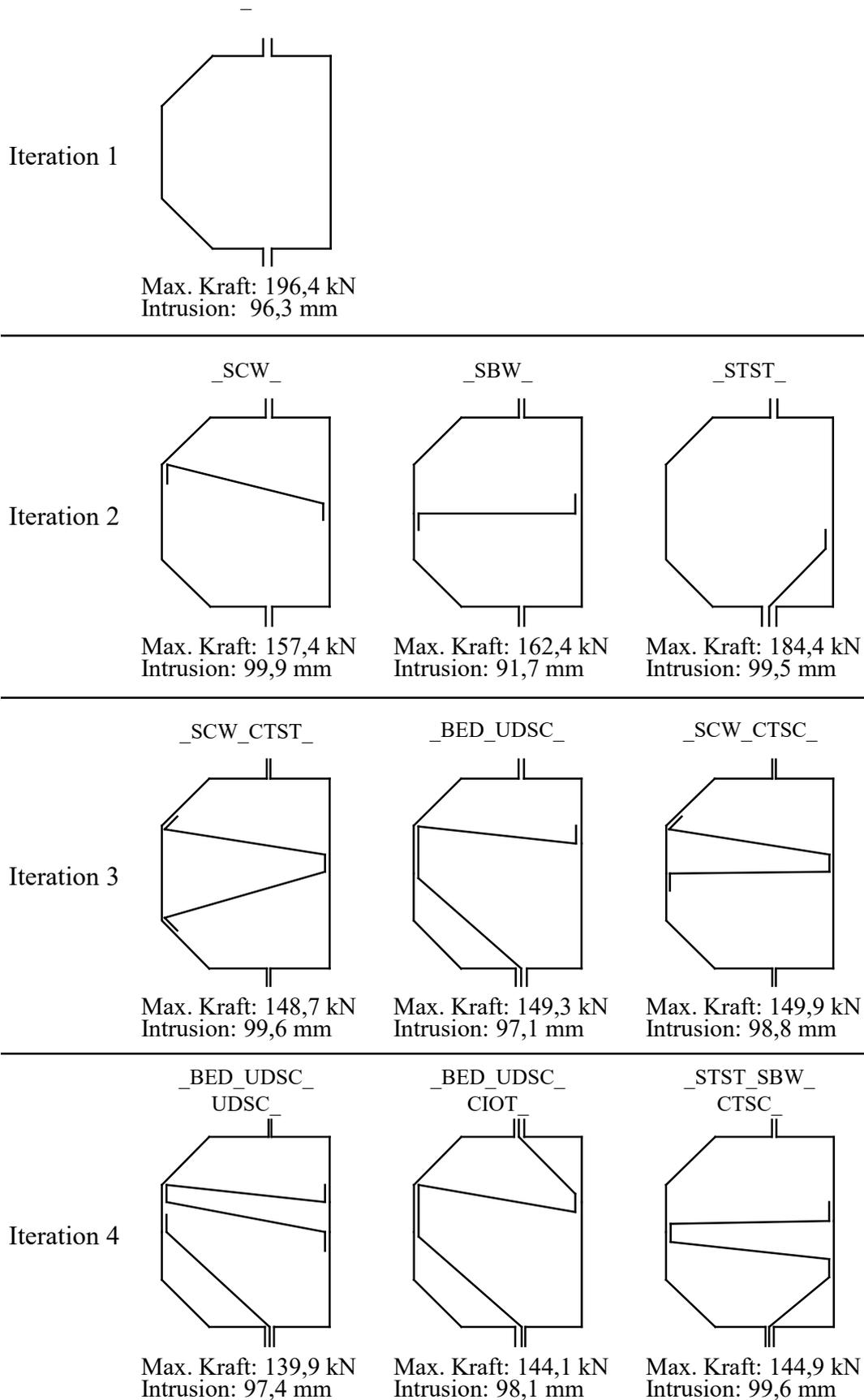


Abbildung 10-4:Optimierung A – Optimierungshistorie mit den besten drei Entwürfen pro Iteration

Der Vergleich der Kraft-Intrusions-Kurven von dem Optimum und dem Startentwurf zeigt, dass eine deutliche Reduzierung des maximalen Kraftlevels erreicht wurde (s. Abbildung 10-7). Die maximale Kontaktkraft konnte von 196,4 kN auf 139,9 kN reduziert werden, was einer Verringerung um 28,8% entspricht. Das theoretisch erreichbare Optimum, also bei konstantem Kraftverlauf und einer Intrusion von 100 mm (bei einer Masse von 300 kg zuzüglich dem Eigengewicht der Struktur), liegt bei ca. 121 kN.

Als zusätzlicher Nebeneffekt kann die Masse des Seitenschweller von 6,719 kg auf 5,638 kg (-16,1 %) reduziert werden. In der Optimierung ist beim Fügen ein Auftreffwinkel des Lasers von maximal 45° erlaubt, damit die Designfreiheit möglichst groß ist. Sowohl das Optimum als auch der Großteil der erzeugten Entwürfe zeigt, dass diese Designfreiheit zumindest in dieser Optimierung nicht notwendig gewesen wäre.

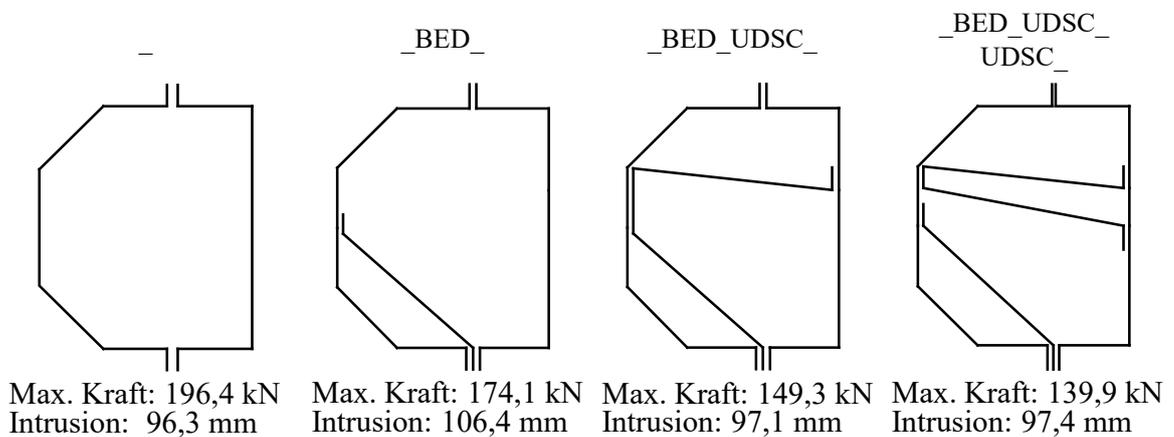


Abbildung 10-5: Optimierung A – Optimierungshistorie zum besten Entwurf

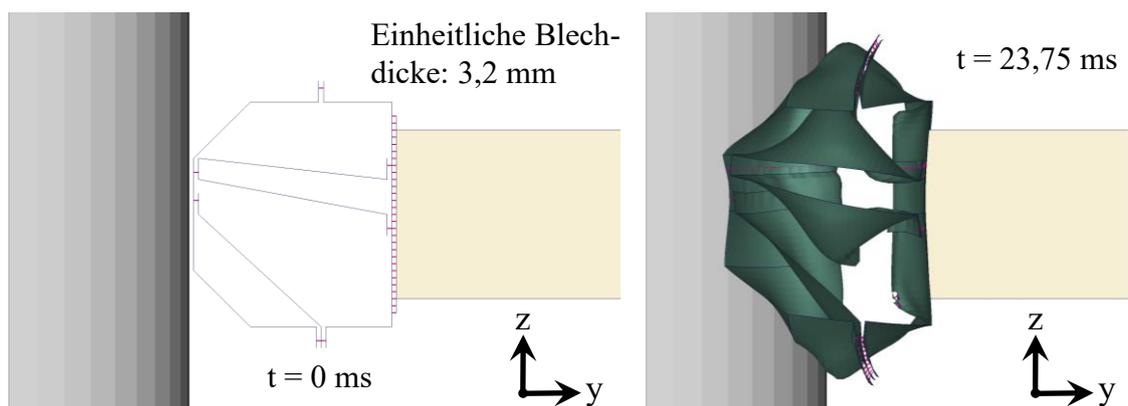


Abbildung 10-6: Undeformierter (links) und maximal deformierter (rechts) Zustand des besten Entwurfs aus Optimierung A in der Seitenansicht

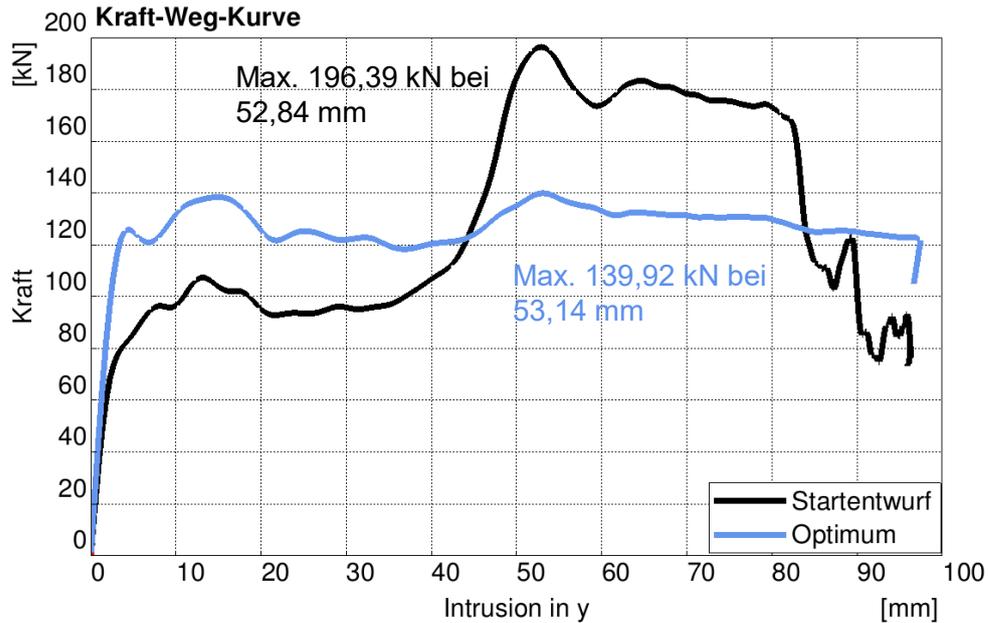


Abbildung 10-7: Vergleich der Kraft(CFC600)-Intrusions-Kurve des besten Entwurfs (Optimierung A) mit der des Startentwurfs

10.2.2 Optimierung B: Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen für das Fügen und Biegeumformen mit Dimensionierung der einzelnen Blechdicken

In dieser Optimierung wurden bis auf die Dimensionierungsmethodik die gleichen Optimierungseinstellungen wie in Optimierung A (s. Abschnitt 10.2.1 Tabelle 10-2) verwendet. Für die Bewertung aller Entwürfe wurde jeweils eine Dimensionierung genutzt, nun jedoch mit einer Entwurfsvariablen pro Blech des Profils (s. Abschnitt 9.2). Die Anzahl an Blechen ergibt sich aus dem jeweiligen Entwurf und änderte sich im Verlauf der Optimierung für die dort erzeugten und bewerteten Entwürfe. Für die Dimensionierung wurden maximal zwei Funktionsaufrufe pro Entwurfsvariable in jeder Iteration durchgeführt. Die maximale Anzahl der Iterationen ergibt sich aus der zweifachen Anzahl der Entwurfsvariablen.

Abbildung 10-8 und Abbildung 10-9 zeigen den Profilquerschnitt der besten drei Entwürfe pro Iteration bis zum Erreichen des besten Entwurfs in Iteration 7. Beginnend mit einer Kontaktkraft von 196,4 kN für den Startentwurf wurde die Kontaktkraft in jeder Iteration weiter reduziert. Der beste Entwurf dieser Optimierung wurde in Iteration 7 gefunden. Er hat eine maximale Kontaktkraft von 135,9 kN bei einer maximalen Intrusion von 100,0 mm.

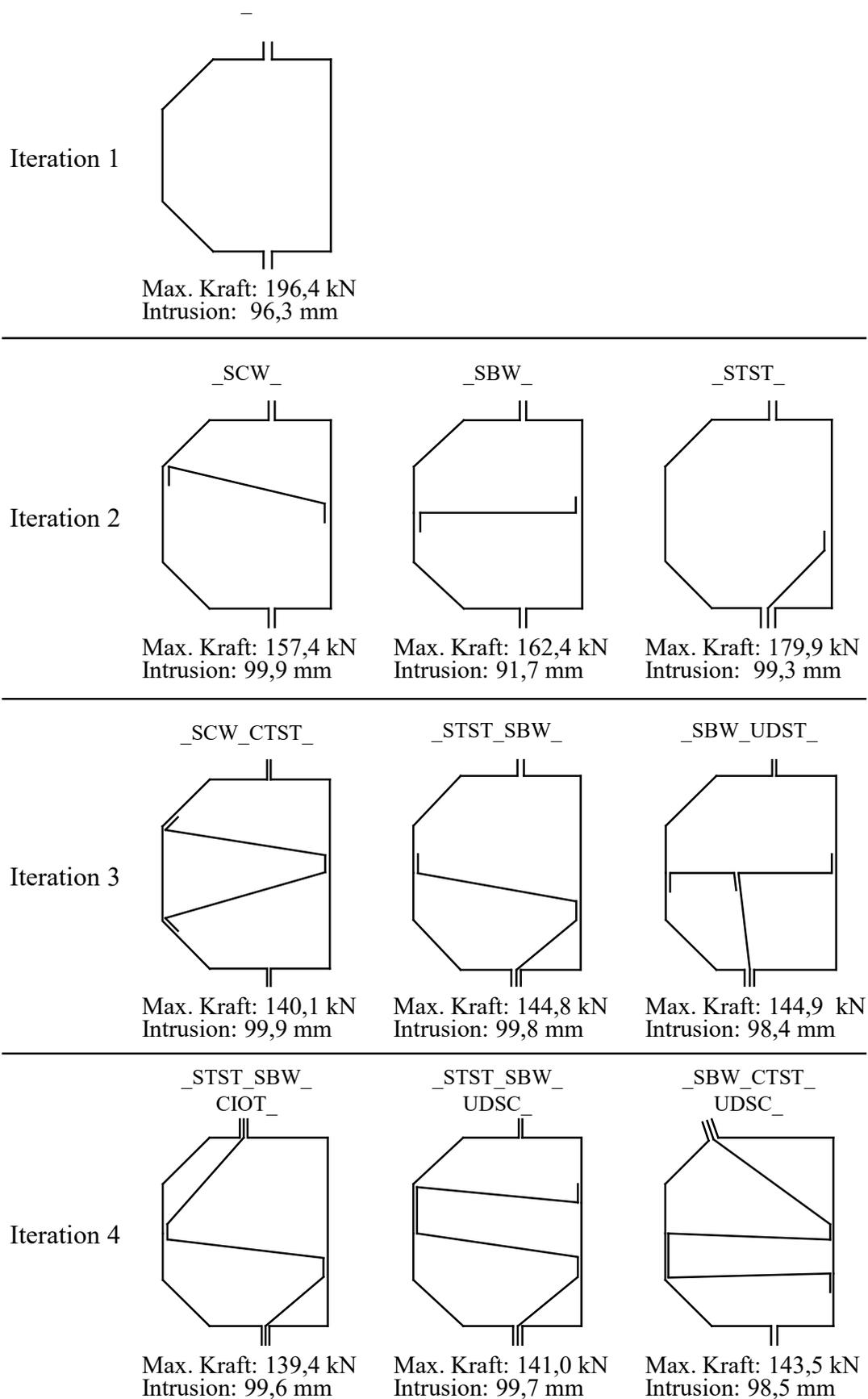


Abbildung 10-8: Optimierung B – Optimierungshistorie mit den besten drei Entwürfen von Iteration 1 bis Iteration 4

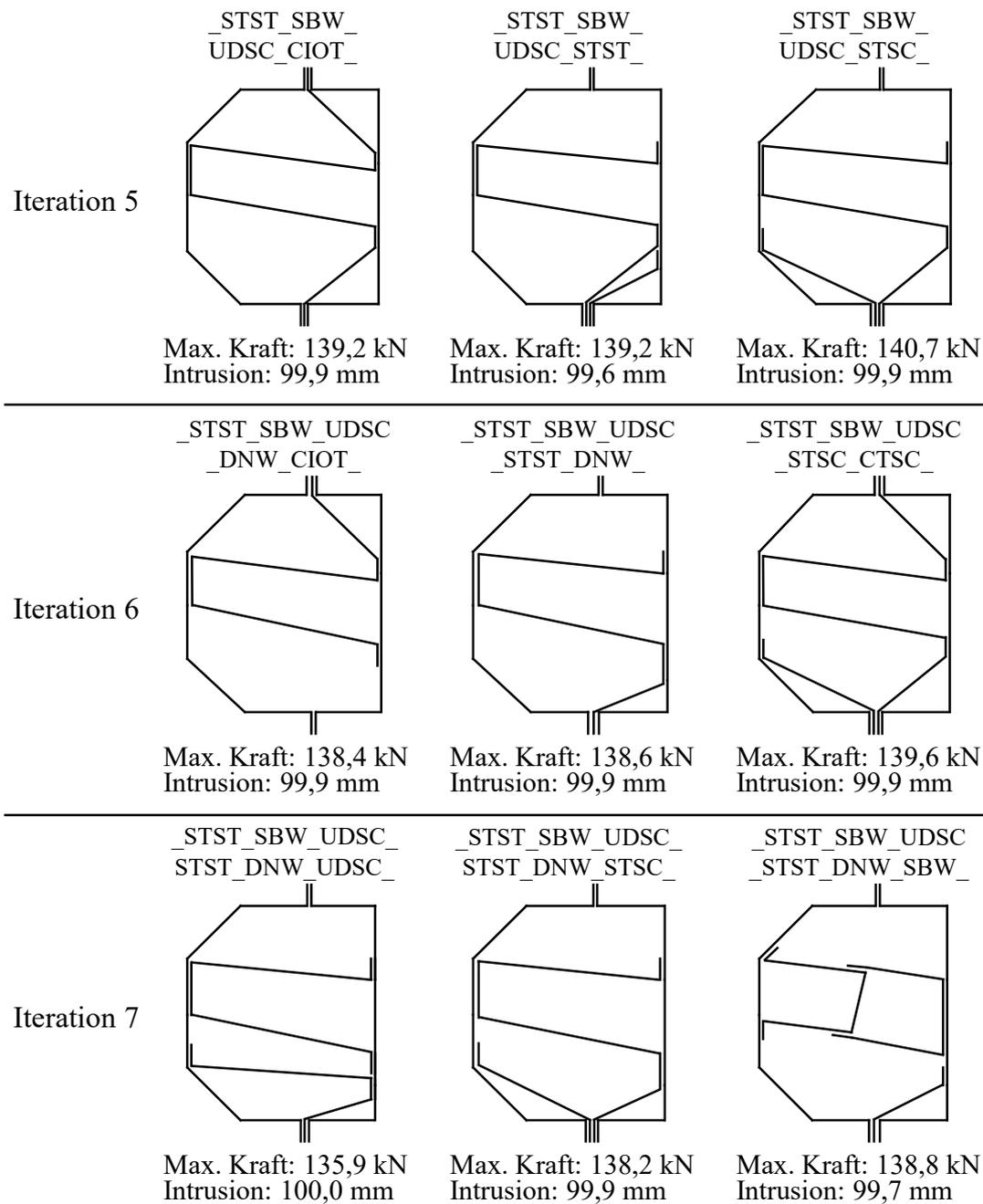


Abbildung 10-9: Optimierung B – Optimierungshistorie mit den besten drei Entwürfen von Iteration 5 bis Iteration 7

Die Entwürfe SCW und SBW aus Iteration 2 sind nicht fertigbar und wurden von der Optimierungsstrategie für *vielversprechende Entwürfe* zunächst zugelassen. Das Gleiche gilt für die Entwürfe `_SBW_UDST_` (Iteration 3) und `_STST_SBW_UDSC_STST_DNW_SBW_` (Iteration 7).

Die Optimierungshistorie vom besten Entwurf zeigt Abbildung 10-10. In diesem Fall gehören alle Entwürfe auf dem Weg zum besten Entwurf zu den besten drei Entwürfen jeder Iteration.

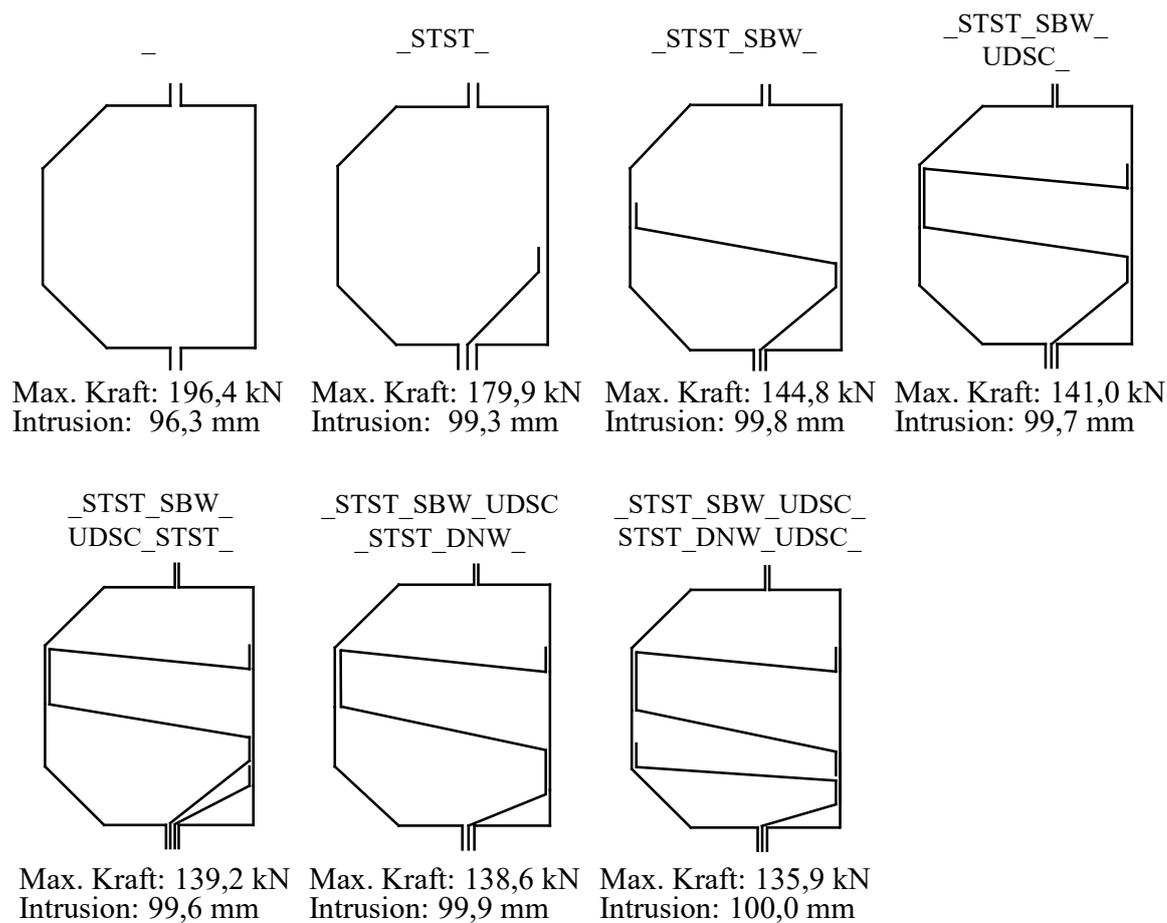


Abbildung 10-10: Optimierung B – Optimierungshistorie zum besten Entwurf

Insgesamt wurden 118 unterschiedliche Entwürfe in dieser Optimierung untersucht. Zur Bewertung dieser Entwürfe durch eine Dimensionierung mit einer Entwurfsvariablen für jede Blechdicke wurden 5319 Funktionsaufrufe durchgeführt. Im Durchschnitt waren das 45 Funktionsaufrufe für die Bewertung jedes Entwurfs. Die Entwürfe haben durchschnittlich 3,6 Bleche. Im Vergleich dazu benötigt eine Optimierung mit ebenfalls 118 bewerteten Entwürfen, mit nur einer Entwurfsvariablen in der Dimensionierung der Blechdicke für die gesamte Profilstruktur ungefähr 709 Funktionsaufrufe.

Die inneren Bleche des besten Entwurfs aus Iteration 7 bestehen aus einem Hut- und einem Trapezprofil. Die Fügestellen und die Dicken der Bleche sind in Abbildung 10-11 im undeformierten Zustand sichtbar. In dem Deformationsbild des Optimums ist ersichtlich, dass das Materialversagen und die Elementlöschungen an den Kontaktstellen zwischen dem Seitenschweller und dem Sitzquerträger im Vergleich zum Startentwurf nahezu nicht mehr vorhanden sind. Die Fügestellen des Seitenschwellers sind intakt und zeigen kein Versagen.

Der Vergleich der Kraft-Intrusions-Kurven vom Optimum und vom Startentwurf zeigt, dass eine starke Reduzierung des maximalen Kraftlevels erreicht wurde (s. Abbildung 10-12). Die maximale Kontaktkraft konnte von 196,4 kN auf 135,9 kN reduziert werden, was einer Verringerung von 30,8% entspricht.

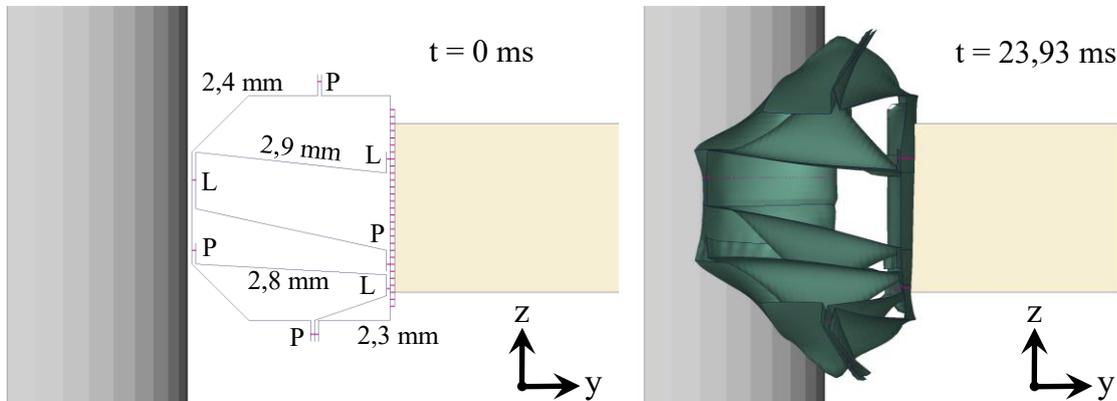


Abbildung 10-11: Undeformierter (links) und maximal deformierter (rechts) Zustand des besten Entwurfs aus Optimierung B in der Seitenansicht (mit Blechdicken) – Fügen mit Laserstrahlschweißen (L) und Punktschweißen (P)

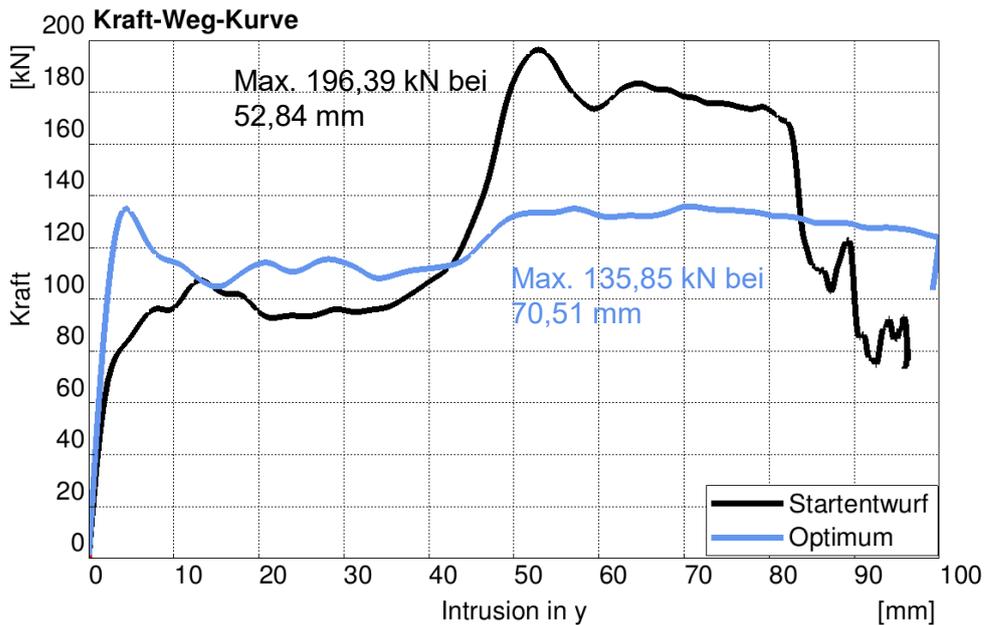


Abbildung 10-12: Vergleich der Kraft(CFC600)-Intrusions-Kurve des besten Entwurfs (Optimierung B) mit der des Startentwurfs

Im Vergleich zu dem besten Entwurf aus Optimierung A, in der nur eine Blechdicke für das gesamte Profil in der Dimensionierung verwendet wurde, konnte die maximale Kontaktkraft in dieser Optimierung durch eine Dimensionierung mit einer Entwurfsvariablen für jedes Blech eines Entwurfs, um weitere 4,0 kN (2,0 %) reduziert werden.

Der zusätzliche Simulationsaufwand ist mit 5319 im Vergleich zu 667 Funktionsaufrufen für die Optimierung groß, wobei die Funktionsaufrufe in der Dimensionierung bei nahezu gleichbleibender Optimierungsgüte vermutlich weiter reduziert werden können. Das geringfügig bessere Optimierungsergebnis rechtfertigt jedoch nicht den deutlich größeren Simulationsaufwand bei der Bewertung aller Entwürfe durch eine Dimensionierung mit einer Entwurfsvariablen pro Blech. Die Empfehlung ist hier, die Bewertung aller Entwürfe der Optimierung durch eine Dimensionierung durchzuführen, in der nur eine Entwurfsvariable für die Wandstärke genutzt wird. Für den besten Entwurf der Optimierung kann zuletzt eine Dimensionierung mit einer Wandstärke für jedes Blech des Entwurfs durchgeführt werden, um somit das größtmögliche Aufwand-Nutzen-Potenzial zu erreichen.

10.2.3 Optimierung C: Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen für das Fügen und ohne Biegeumformen

Die Fertigungsrestriktionen für das Biegeumformen (s. Abschnitt 7.3) berücksichtigen die geometrische Zugänglichkeit der Werkzeuge beim Schwenkbiegen, wodurch nur relativ simple Strukturen fertigbar sind und im Optimierungsprozess verwendet werden. Um die Entwurfsvfreiheit in der Optimierung zu erhöhen, aufwendigere Geometrien zu ermöglichen und den Einfluss der Fertigungsrestriktionen des Schwenkbiegens zu zeigen, wurde eine Optimierung ohne deren Fertigungsrestriktionen durchgeführt. Diese liefert auch eine erste Abschätzung darüber, ob eine Entwicklung von Fertigungsrestriktionen für das Rollformen, inklusive einer Implementierung in die GHT, sinnvoll ist.

In dieser Optimierung wurden bis auf die Fertigungsrestriktionen für das Biegeumformen der Bleche die gleichen Optimierungseinstellungen wie in Optimierung A (s. Abschnitt 10.2.1 Tabelle 10-2) verwendet. Um komplexere Topologien mit vielen inneren Wänden zu erhalten, wurde das Abbruchkriterium zum Stoppen der Optimierung auf drei Iterationen ohne Verbesserung gesetzt.

Abbildung 10-13 und Abbildung 10-14 zeigen zusammen den Profilquerschnitt der besten drei Entwürfe pro Iteration bis zum Erreichen des besten Entwurfs in Iteration 7. Die besten drei Entwürfe der ersten drei Iterationen sind identisch mit den Ergebnissen aus Optimierung A (s. Abschnitt 10.2.1). Die beiden besten Entwürfe (`_SCW_` und `_SBW_`) aus Iteration 2 sind auch hier nicht fertigbar, da sie nicht gefügt werden können. Der Entwurf `_SBW_BED_SBW_UDSC_` aus Iteration 5 ist der einzige nicht fübare Entwurf aus Abbildung 10-14.

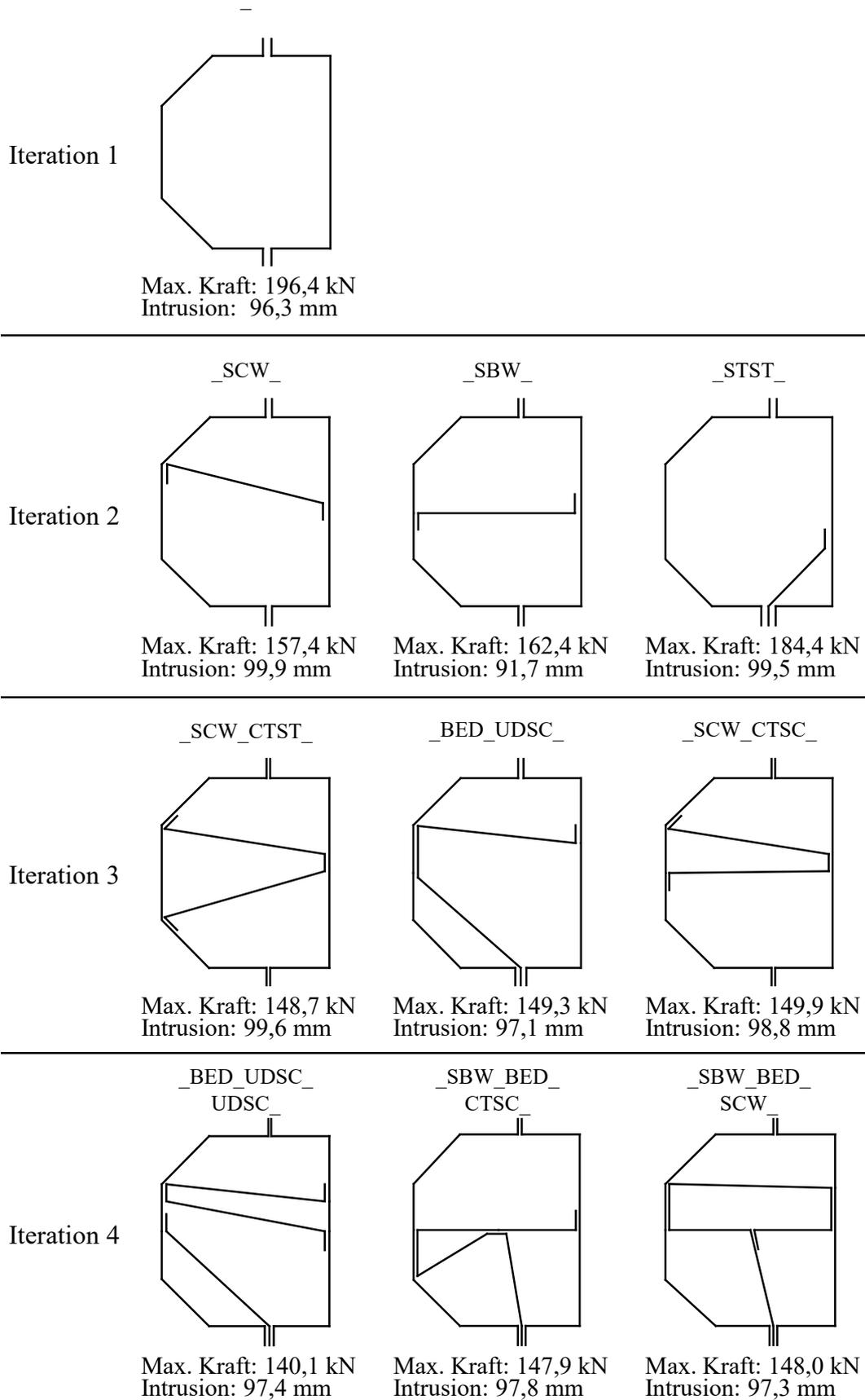


Abbildung 10-13: Optimierung C – Optimierungshistorie mit den besten drei Entwürfen von Iteration 1 bis Iteration 4

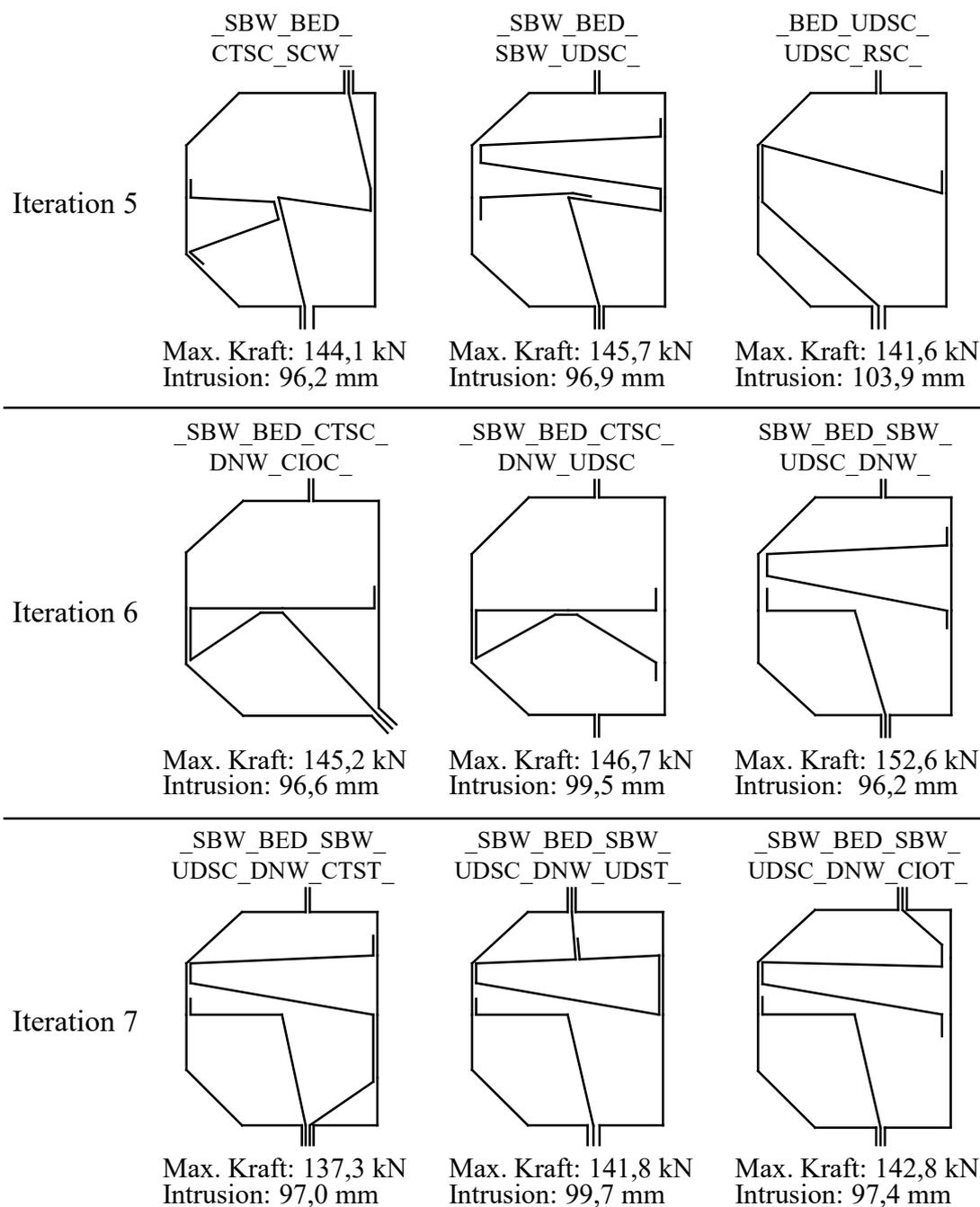


Abbildung 10-14: Optimierung C – Optimierungshistorie mit den besten drei Entwürfen von Iteration 5 bis Iteration 7

Ab Iteration 4 bilden sich in den Entwürfen Strukturen aus, bei denen einzelne Bleche ein geschlossenes Profil darstellen (zum Beispiel der Entwurf _SBW_BED_SBW_UDSC_DNW_UDST_). Diese Strukturen werden aufgrund der in dieser Arbeit erzeugten Fertigungsrestriktionen für das Schwenkbiegen als nicht fertigbar deklariert, da beim Schwenkbiegen das Werkzeug zum Fixieren eines Blechschenkels das Umformen des Blechs zu einem geschlossenen Profil behindert.

Der beste Entwurf dieser Optimierung (`_SBW_BED_SBW_UDSC_DNW_CTST_`) ist aus einem solchen Entwurf entstanden, der die Fertigungsrestriktionen für das Schwenkbiegen nicht erfüllt, und wäre somit in einer Optimierung mit den Fertigungsrestriktionen für das Schwenkbiegen nicht entstanden. Durch die Topologieänderung mit den Heuristiken und die dadurch neue Aufteilung der Blechpfade im Profilquerschnitt ist der Entwurf mit den Fertigungsrestriktionen für das Schwenkbiegen fertigbar.

Die Optimierungshistorie vom besten Entwurf zeigt Abbildung 10-15. Aus der Abfolge der Entwürfe ist zu erkennen, dass sich die Aufteilung der Bleche durch die Pfadfindung ändern kann, wenn eine Topologiemodifikation stattfindet.

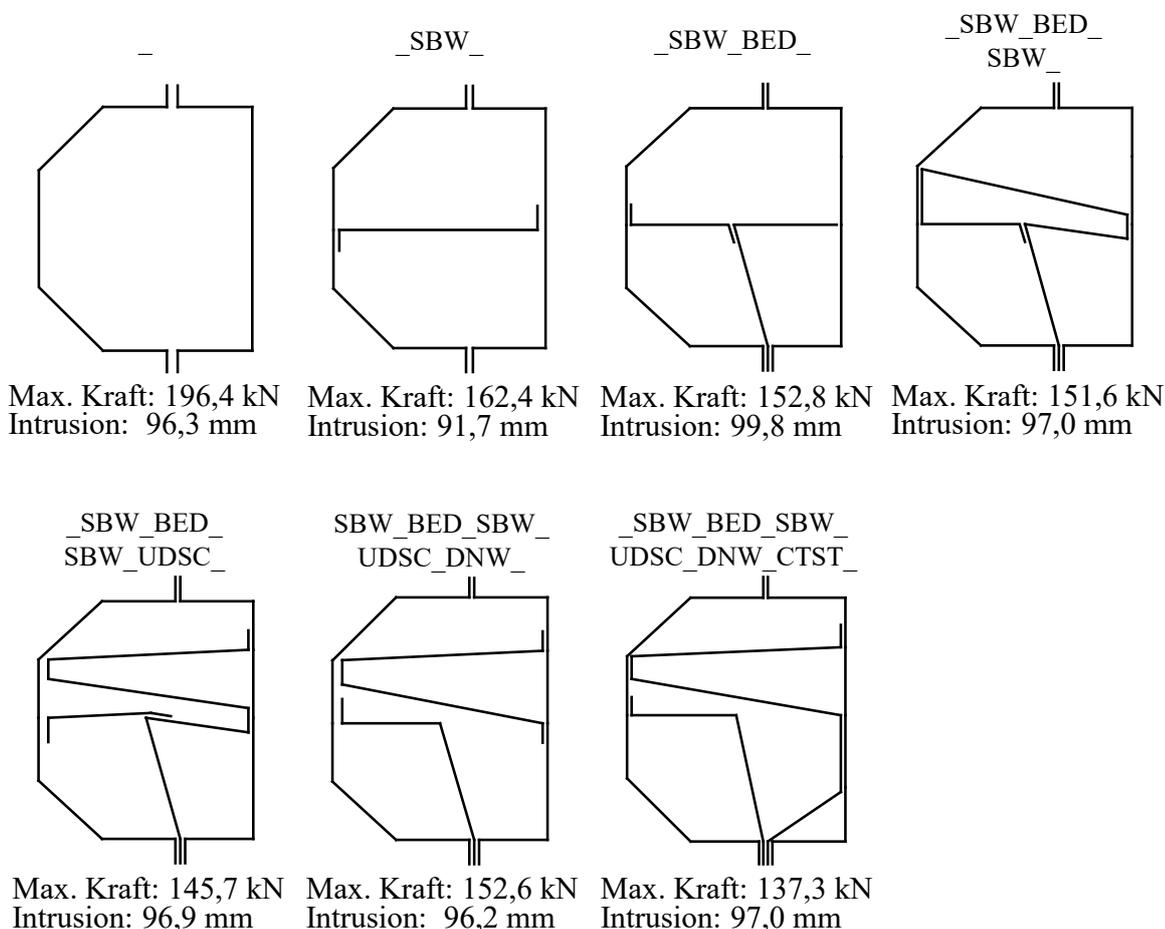


Abbildung 10-15: Optimierung C – Optimierungshistorie zum besten Entwurf

Bei dieser Untersuchung muss beachtet werden, dass die in dieser Arbeit konzipierte Pfadfindung die äußere Schale der Profilstruktur immer durch Bleche abbildet, die nicht in das Innere der Struktur hineinreichen können. Dementsprechend ist es nicht möglich, komplexere Bleche zu erzeugen, die sowohl Bestandteil der äußeren als auch der inneren Struktur sind. Wenn dies noch berücksichtigt wird, können vermutlich deutlich komplexere Entwürfe erzielt werden.

Bis zum Erreichen des Optimums in Iteration 7 wurden insgesamt 137 unterschiedliche Entwürfe mit 823 Funktionsaufrufen untersucht. Der beste Entwurf besteht aus zwei inneren und zwei äußeren Blechen. Die beiden äußeren Bleche bilden die äußere Schale des Profils. Die inneren Bleche bestehen aus zwei Trapezprofilen. Abbildung 10-16 zeigt die Fügstellen der Bleche im undeformierten Entwurf. Der deformierte Seitenschweller hat keine Elementlöschungen mehr an der Kontaktstelle zum Sitzquerträger. Die Fügstellen des Seitenschwellers sind intakt und zeigen kein Versagen.

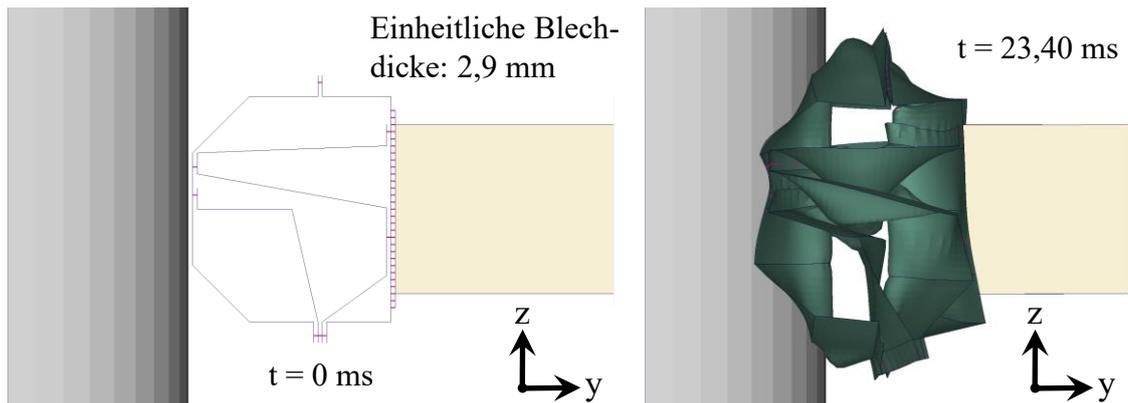


Abbildung 10-16: Undeformierter (links) und maximal deformierter (rechts) Zustand des besten Entwurfs (`_SBW_BED_SBW_UDSC_DNW_CTST_`) aus Optimierung C in der Seitenansicht

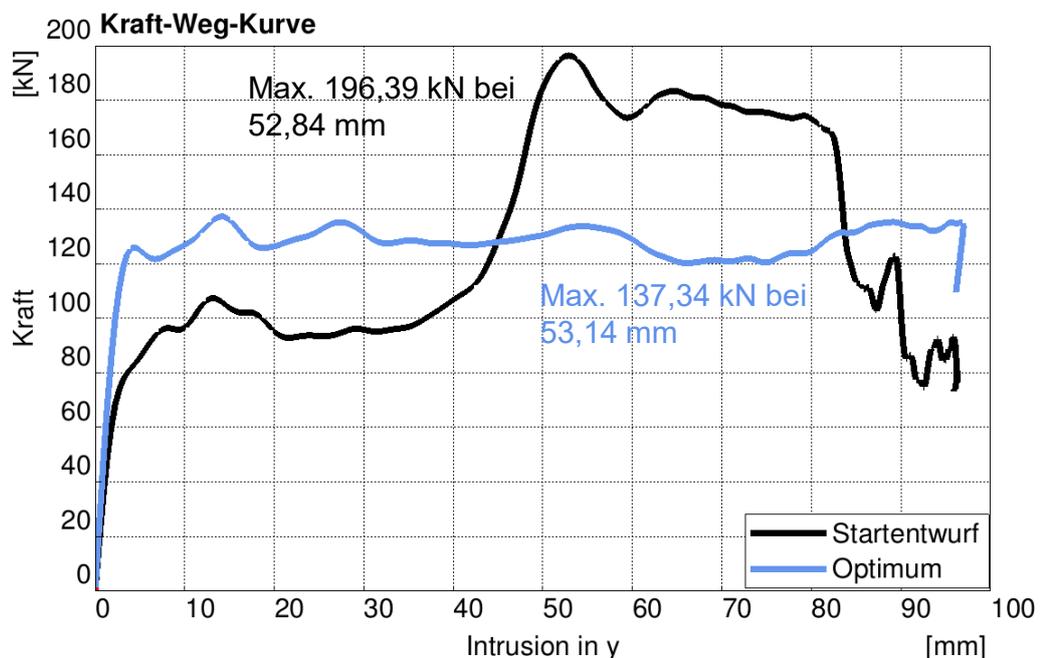


Abbildung 10-17: Vergleich der Kraft(CFC600)-Intrusions-Kurve des besten Entwurfs (Optimierung C – `_SBW_BED_SBW_UDSC_DNW_CTST_`) mit der des Startentwurfs

Der Vergleich der Kraft-Intrusions-Kurven vom Optimum und vom Startentwurf zeigt, dass eine starke Reduzierung des maximalen Kraftlevels erreicht wurde (s. Abbildung 10-7). Die maximale Kontaktkraft konnte von 196,4 kN auf 137,3 kN reduziert werden, was einer Verringerung von 30,1% entspricht. Das theoretisch erreichbare Optimum liegt bei ca. 121 kN. Im Vergleich zu Optimierung A (max. Kraft = 139,9 kN) konnte die maximale Kraft um weitere 1,3% reduziert werden.

Als zusätzlicher Nebeneffekt konnte die Masse des Seitenschwellers von 6,719 kg auf 5,967 kg (-11,2 %) gesenkt werden.

10.3 Optimierung D: Minimierung der Masse

Als Simulationsmodell für die Optimierung wurde das Anwendungsbeispiel aus Abschnitt 10.1 verwendet. Das Optimierungsproblem und die Optimierungseinstellungen sind in Tabelle 10-3 zusammengefasst. Das Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Masse des Seitenschwellers. Die Restriktion ist zum einen die Intrusion des Pfahls in den Schweller, die maximal 100 mm betragen darf und somit der ungefähren Intrusion des Startentwurfs entspricht. Zum anderen darf die maximale Kontaktkraft zwischen dem Seitenschweller und dem Pfahl maximal 196,4 kN erreichen (maximale Kontaktkraft des Startentwurfs).

In dieser Optimierung sind die Fertigungsrestriktionen für das Fügen von Blechen mit Punktschweißen und Laserstrahlschweißen aktiv. Zusätzlich sind die Fertigungsrestriktionen für das Biegeumformen der Bleche wieder aktiv. An den Fügstellen an den Enden der Bleche der äußeren Struktur sind maximal vier Bleche pro Fügstelle erlaubt. An allen anderen Fügstellen sind maximal drei Bleche pro Fügstelle zulässig. Die Optimierung stoppt sobald in einer Iteration keine Verbesserung erzielt wird. Für die Bewertung aller Entwürfe wurde jeweils eine Dimensionierung mit einer Entwurfsvariablen für die Blechdicke des gesamten Profils verwendet. Dafür wurden wieder maximal sechs Funktionsaufrufe pro Entwurf genutzt, die sich auf zwei Iterationen aufteilen. Für den besten Entwurf der gesamten Optimierung wurde erneut eine Dimensionierung mit einer Entwurfsvariablen pro Blech des Profils durchgeführt (s. Abschnitt 9.2).

Die Profilquerschnitte der besten drei Entwürfe jeder Iteration sind in Abbildung 10-18 und Abbildung 10-19 dargestellt. Die Optimierungshistorie vom besten Entwurf zeigt Abbildung 10-20. Die Masse des Seitenschwellers konnte in jeder Iteration konsekutiv reduziert werden.

Die Entwürfe `_SBW_` und `_SCW_` aus Iteration 2 sind nicht fügbar, wurden aber aufgrund einer positiven Fertigungsprognose vorübergehend akzeptiert und in Iteration 2 zugelassen (s. Abschnitt 9.3). Dies stellte sich im Verlauf der Optimierung als sinnvoll heraus, da der optimale Entwurf auf dem Entwurf `_SBW_` basiert.

Tabelle 10-3: Beschreibung der Aufgabe für die Optimierung D: Minimierung der Masse

Zielfunktion	Minimierung der Masse des Seitenschwellers
Restriktion	<ul style="list-style-type: none"> • Intrusion des Seitenschwellers (in y-Richtung) ≤ 100 mm • Maximale gefilterte (CFC 600) Kontaktkraft zwischen Seitenschweller und Pfahl $\leq 196,4$ kN
Fertigungsrestriktionen	<ul style="list-style-type: none"> • Verbindungswinkel zwischen zwei Wänden $\geq 15^\circ$ • Abstand zweier Wände ≥ 15 mm • $0,5$ mm \leq Blechdicke $\leq 5,0$ mm • Verbinden von Blechpfaden ≤ 75 mm • Check für Biegeumformung: aktiv • Check zum Widerstandspunktschweißen: Platzbedarf von 10 mm für die Elektrode mit Neigungswinkel $\alpha \leq 5^\circ$ • Check zum Laserstrahlschweißen: Platzbedarf von 10 mm für Laser und Fixierung mit Neigungswinkel $\beta \leq 45^\circ$ • Anzahl an Blechen pro Fügestelle für äußere Fügstellen ≤ 4 • Anzahl an Blechen pro Fügestelle für innere Fügstellen ≤ 3
Fügeparameter	<ul style="list-style-type: none"> • Flanschüberlappung = 15 mm • Fügespalt = 0,2 mm • Schweißpunktstand = 30 mm • Festigkeiten der Schweißpunkte und Schweißnähte in Abhängigkeit von den Blechpaarungen am Flansch (s. Kapitel 6)
Einstellungen	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensionierung (s. Kapitel 9) mit einer Dicke für alle Bleche und max. 6 Funktionsaufrufen pro Entwurf • Finale Dimensionierung des besten Entwurfs mit Dimensionierung mit einer eigenen Blechdicke für jedes Blech des Profils • Optimierungsstrategie <i>vielversprechende Entwürfe</i> ist aktiv (s. Abschnitt 9.3) • Abbruchkriterium: Eine Iteration ohne Verbesserung • Anzahl konkurrierender Entwürfe $N_{cd} = 5$

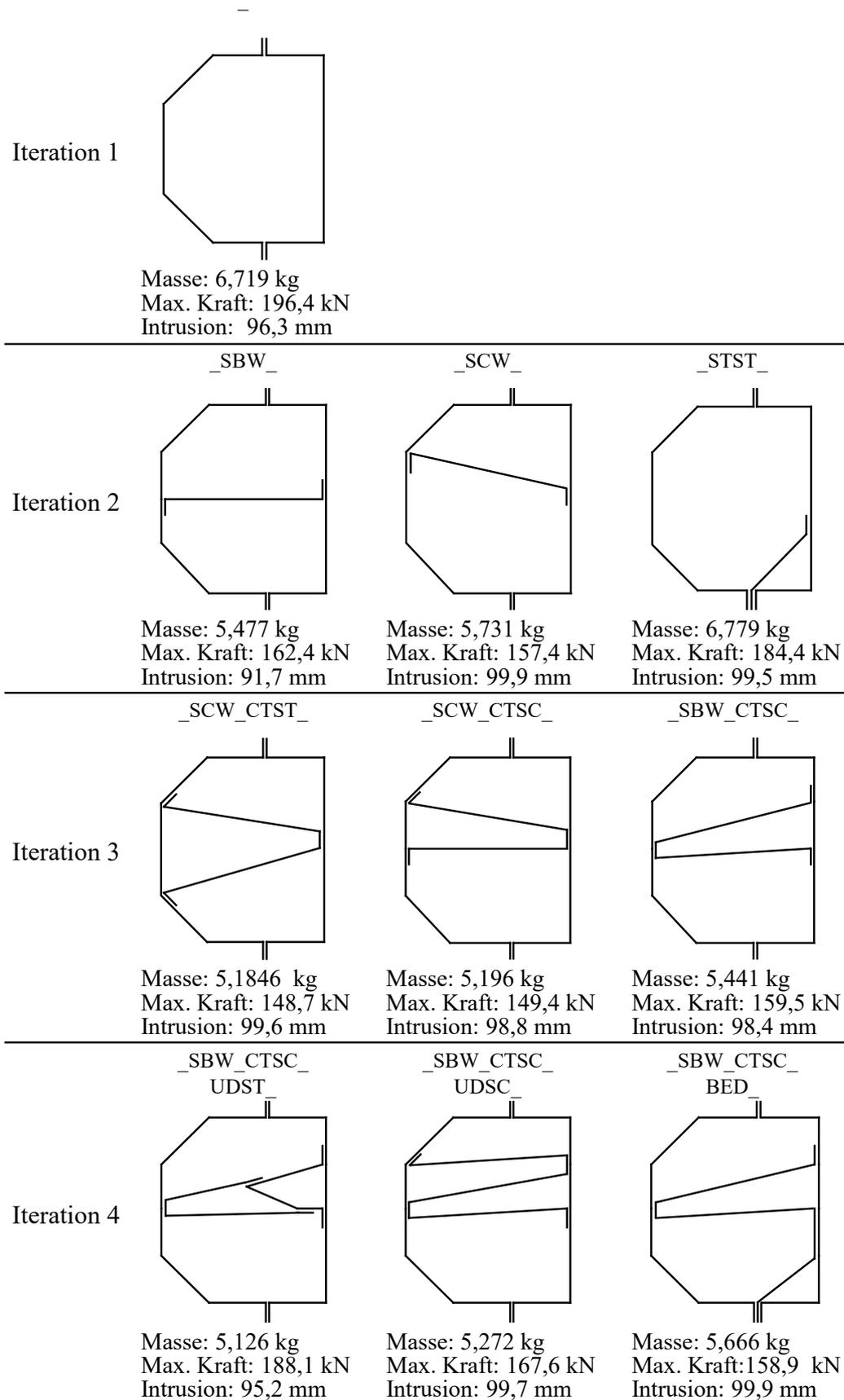


Abbildung 10-18: Minimierung der Masse – Optimierungshistorie mit den besten drei Entwürfen von Iteration 1 bis Iteration 4

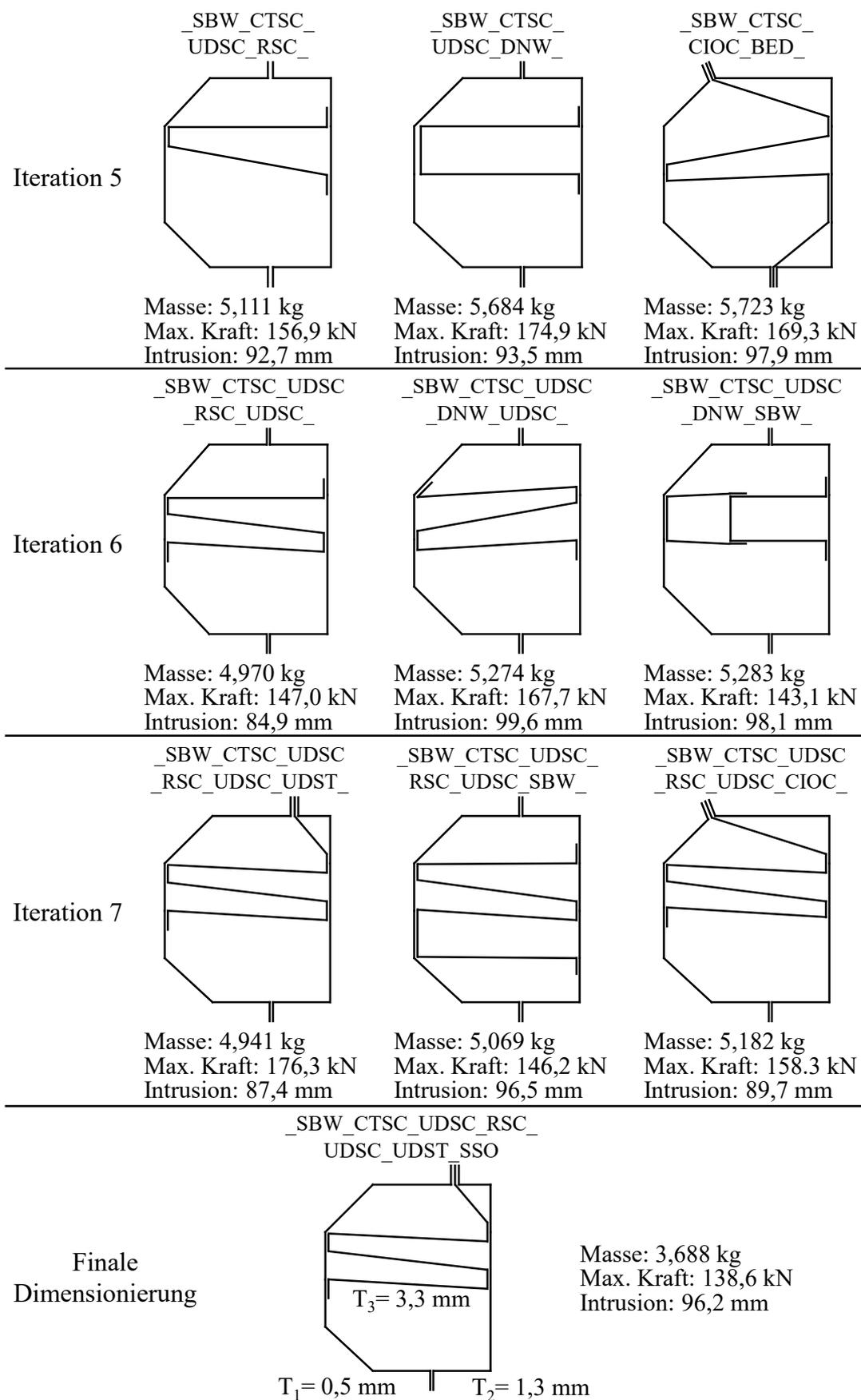


Abbildung 10-19: Minimierung der Masse – Optimierungshistorie mit den besten drei Entwürfen von Iteration 5 bis Iteration 7 - T_1 bis T_3 : Blechdicken des finalen Entwurfs

Sowohl der Entwurf `_SBW_CTSC_UDSC_` aus Iteration 3 als auch die Entwürfe `_SBW_CTSC_UDSC_RSC_UDSC_` und `_SBW_CTSC_UDSC_DNW_UDSC_` aus Iteration 6 sind nicht ffügbar, da die äußeren Flansche des inneren Blechs nicht alle im Zusammenbau zugänglich sind. Diese Entwürfe wurden ebenfalls aufgrund einer positiven Fertigungsprognose zugelassen und können mit einer topologischen Modifikation wieder fertigbar werden. Das passierte bei dem besten Entwurf aus Iteration 6, der durch eine topologische Modifikation fertigbar wurde und somit der beste Entwurf aus Iteration 7 und der gesamten Optimierung ist.

In der finalen Dimensionierung für den bislang besten Entwurf der Optimierung – `_SBW_CTSC_UDSC_RSC_UDSC_UDST_` – wurde für die Wandstärke jedes Blechs eine Entwurfsvariable verwendet (s. Abschnitt 9.2). Da der Entwurf aus drei Blechen besteht, wurden drei Entwurfsvariablen benutzt. Insgesamt wurden in der Dimensionierung 10 Iterationen mit jeweils 9 Funktionsaufrufen durchgeführt, wodurch sich eine gesamte Anzahl von 90 Funktionsaufrufen für die Dimensionierung dieses Entwurfs ergibt. In der gesamten Optimierung wurden 130 unterschiedliche Entwürfe mit insgesamt 870 Funktionsaufrufen untersucht, einschließlich der finalen Dimensionierung.

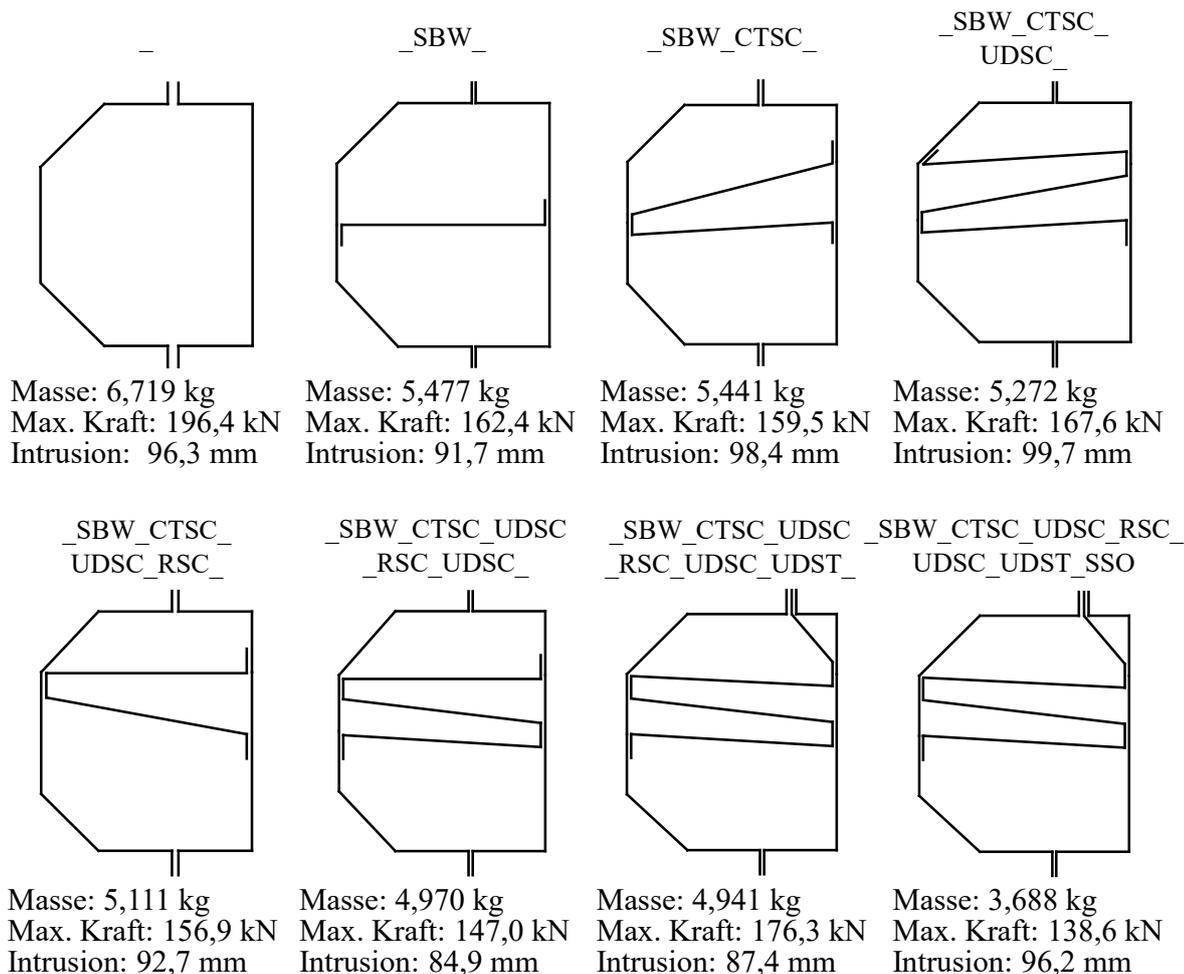


Abbildung 10-20: Optimierung D – Optimierungshistorie zum besten Entwurf

Der optimale Entwurf nach der finalen Dimensionierung besteht aus einem inneren und zwei äußeren Blechen. Die beiden äußeren Bleche bilden die äußere Schale des Profils. Das innere Blech ist ein unregelmäßiges Trapezprofil. Die Fugestellen der Bleche sind in Abbildung 10-21 im undeformierten Entwurf sichtbar (Simulationszeitpunkt $t = 0$ ms). In dem Deformationsbild des Optimums (Simulationszeitpunkt $t = 23,69$ ms) ist ersichtlich, dass das Materialversagen und die Elementlöschungen an den Kontaktstellen zwischen dem Seitenschweller und dem Sitzquerträger deutlich geringer sind als im Startentwurf. Die Fugestelle des inneren Blechs am unteren Ende versagte während der Deformation, wodurch der untere Schenkel des inneren Blechs nicht mehr in Position gehalten wurde und verrutschte.

Die Masse des Seitenschwellers wurde von 6,719 kg auf 3,688 kg (-45,1%) reduziert. Der Vergleich der Kraft-Intrusions-Kurven vom Optimum und vom Startentwurf zeigt, dass als Nebeneffekt eine deutliche Reduzierung des maximalen Kraftlevels erreicht wurde (s. Abbildung 10-22). Die maximale Kontaktkraft konnte von 196,4 kN auf 138,6 kN verringert werden, was einer Reduzierung um 29,4% entspricht. Der beste Entwurf aus Optimierung A hat mit 139,9 kN eine etwas größere maximale Kontaktkraft, bei diesem Entwurf wurde jedoch keine Dimensionierung mit unterschiedlichen Blechdicken durchgeführt, sodass ein direkter Vergleich nicht möglich ist. Die vergleichbare Optimierung B hat allerdings mit 135,9 kN einen geringeren Wert erzielt.

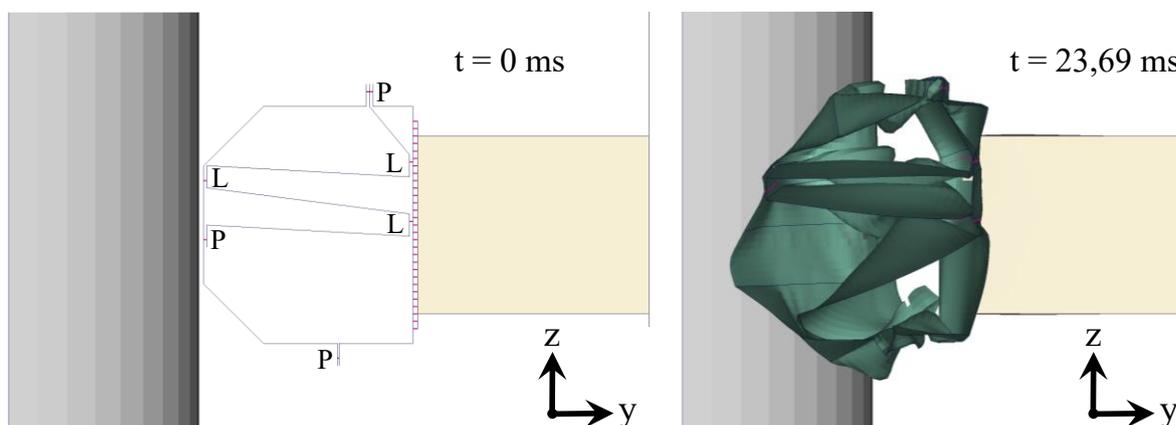


Abbildung 10-21: Undeformierter (links) und maximal deformierter (rechts) Zustand des besten Entwurfs (`_SBW_BED_SBW_UDSC_DNW_CTST_SSO`) aus Optimierung D in der Seitenansicht – Fügen mit Laserstrahlschweißen (L) und Punktschweißen (P)

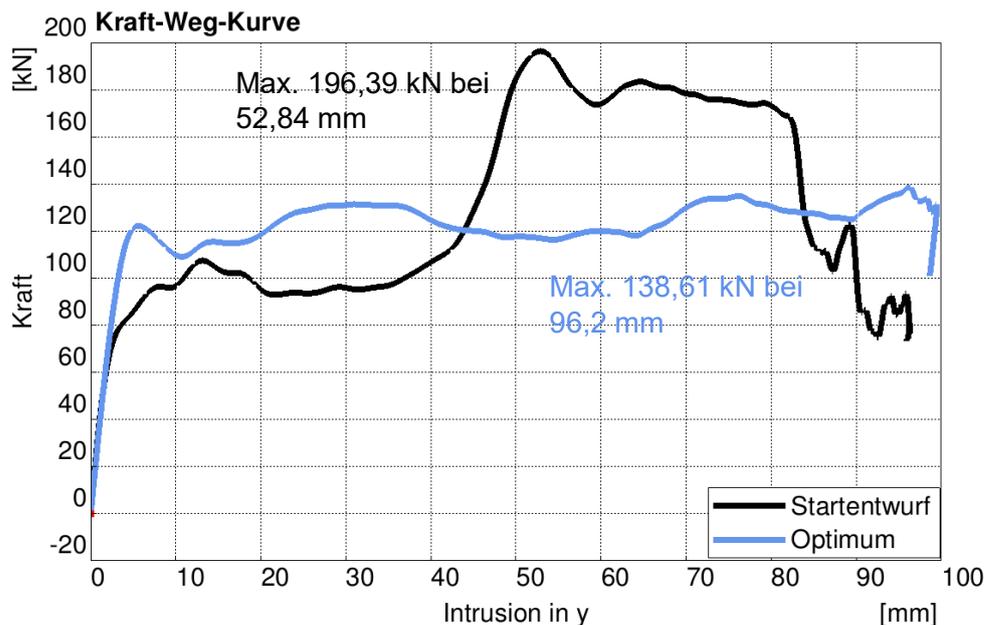


Abbildung 10-22: Vergleich der Kraft(CFC600)-Intrusions-Kurve des besten Entwurfs (Optimierung D – _SBW_CTSC_UDSC_RSC_UDSC_UDST_SSO) mit der des Startentwurfs

10.4 Vergleich der Optimierungsergebnisse mit dem Fertigungskonzept Strangpressen

Um eine Einordnung der Optimierungsergebnisse für das Fertigungskonzept für Profilstrukturen aus verbundenen Blechen zu ermöglichen, wird in diesem Abschnitt ein Vergleich mit dem Fertigungskonzept Strangpressen durchgeführt. Dafür wird das Optimierungsergebnis aus Ortman et al. 2021 herangezogen.

Das Simulationsmodell aus dieser Veröffentlichung und das hier verwendete Modell sind nahezu identisch. Der Unterschied liegt in den Verrundungen an den Profilkanten des Strangpressprofils, die Ortman et al. 2021 verwendet haben, um die Fertigbarkeit zu gewährleisten. Die Verrundungen beeinflussen das mechanische Verhalten, sodass sich dadurch eine Abweichung zwischen den Modellen ergeben kann. Zusätzlich war es notwendig die Blechdicke des Startentwurfs aus verbundenen Blechen anzupassen, damit die gleiche Intrusion wie im Beispiel des stranggepressten Startentwurfs erreicht wurde.

In Tabelle 10-4 ist ein Vergleich der erzielten Verbesserung der Optimierungen für beide Fertigungskonzepte dargestellt. Beim direkten Vergleich der Startentwürfe ist zu erkennen, dass der Startentwurf aus verbundenen Blechen eine höhere maximale Kon-

taktkraft aufweist. Diese resultiert aus den lokalen Versteifungen, die durch die Flansche erzeugt werden. Die prozentuale Verbesserung bezieht sich auf den zur jeweiligen Optimierung gehörenden Startentwurf.

Tabelle 10-4: Vergleich der Optimierungsergebnisse für das Fertigungskonzept für Profilstrukturen aus verbundenen Blechen mit denen für das Fertigungskonzept Strangpressen – Erreichte Zielfunktionswerte sind fett gedruckt

Fertigungskonzept		Max. Kraft [kN]	Masse [kg]	Intrusion [mm]
Strangpressen (s. Ortmann et al. 2021)	Startentwurf	167,1	5,848	96,2
	Min. Kraft	137,1 (-17,9 %)	4,727	99,5
	Min. Masse	157,9	3,584 (-38,7 %)	98,55
Verbundene Bleche	Startentwurf	196,4	6,719	96,3
	Min. Kraft (Optimierung A)	139,9 (-28,8 %)	5,638	97,4
	Min. Masse (Optimierung D)	138,6	3,688 (-45,1 %)	96,2

Die Gegenüberstellung der Querschnitte der besten Entwürfe in Abbildung 10-23 zeigt, dass bei einem identischen Optimierungsproblem deutlich unterschiedliche optimale Topologien für Profilstrukturen aus verbundenen Blechen entstehen.

Sowohl bei der Minimierung der Kontaktkraft als auch bei der Masse konnten vergleichbare Zielwerte für die Kontaktkraft bzw. die Masse wie in den Optimierungen von Ortmann et al. 2021 erreicht werden (s. Tabelle 10-4). Es ist jedoch anzumerken, dass die Masse und die Kontaktkraft bei der Optimierung mit dem Fertigungskonzept für Profilstrukturen aus verbundenen Blechen im Startentwurf deutlich höher sind. Das erzielte Einsparungspotenzial ist ausgehend vom Startentwurf also größer.

Für die Minimierung der Kontaktkraft mit dem Fertigungskonzept Strangpressen wurden 199 Funktionsaufrufe benötigt (Fertigungskonzept verbundene Bleche 667), für die Minimierung der Masse 367 Funktionsaufrufe (Fertigungskonzept verbundene Bleche 870). Die benötigte Anzahl an Funktionsaufrufen für die Optimierungen mit dem Fertigungskonzept für verbundene Bleche ist höher als bei Ortmann et al. 2021, da in dieser Dissertation der Fokus auf dem Ausschöpfen des Verbesserungspotenzials

liegt und dementsprechend bewusst mehr Funktionsaufrufe verwendet wurden (s. Abschnitte 10.2 und 10.3).

Die Deformationsbilder der optimalen Entwürfe beider Optimierungen in Abbildung 10-24 und Abbildung 10-25 zeigen ein ähnliches Materialversagen an den Kontaktstellen zwischen dem Seitenschweller und dem Sitzquerträger. Dort ist auch ersichtlich, dass bei dem Strangpressen die größere Designfreiheit genutzt wird, um mehrere kleinere Kammern zu erzeugen, die die Struktur sehr lokal versteifen (s. Abbildung 10-25). Dies ist bei dem Fertigungskonzept für verbundene Bleche aufgrund der Flansche und der Zugänglichkeit beim Fügen nicht möglich.

Die kleinen Kammern im Strangpressprofil konnten das Ausbeulen der Wände in diesem Bereich deutlich reduzieren, jedoch erzeugte die hohe Steifigkeit lokale Spannungsspitzen, die für ein Materialversagen und Elementlöschungen verantwortlich sind.

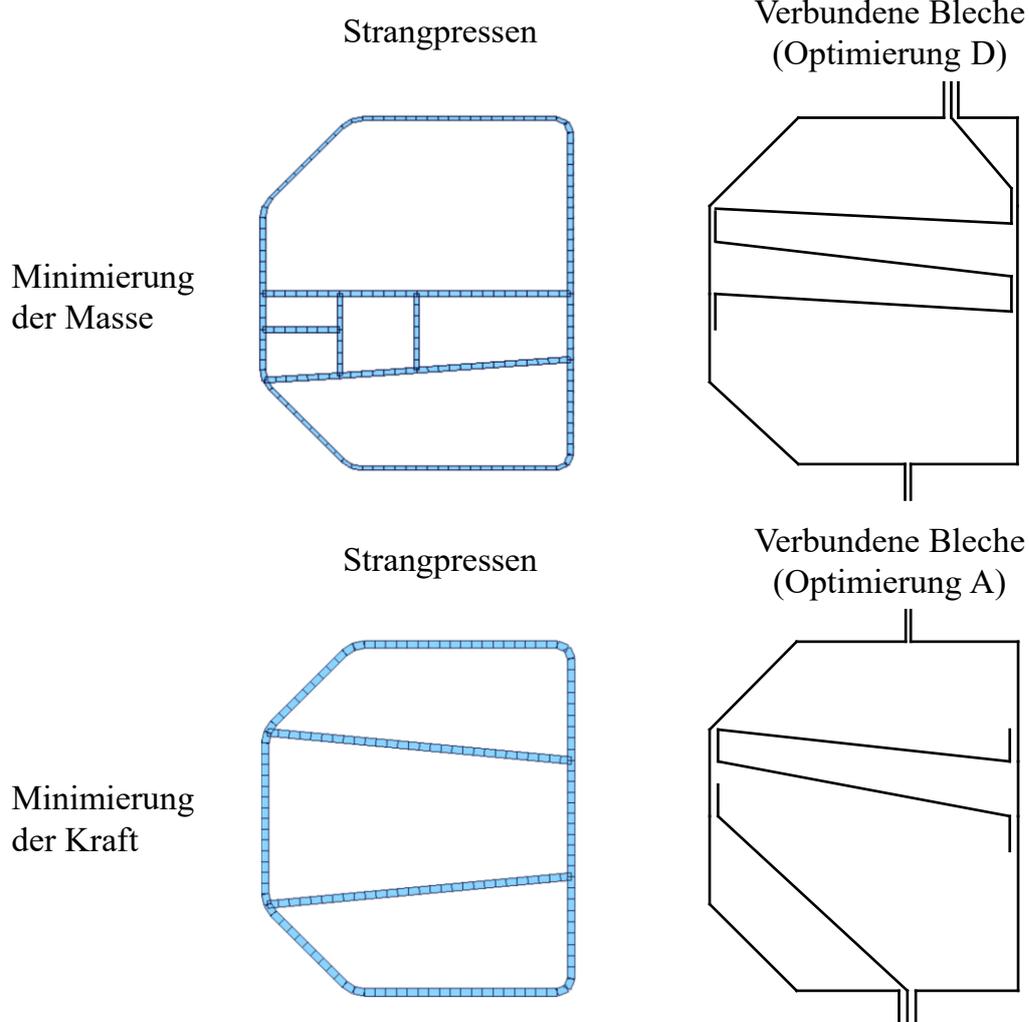


Abbildung 10-23: Vergleich der undeformierten Querschnitte der besten Entwürfe von dem Fertigungskonzept Strangpressen und dem Fertigungskonzept verbundene Bleche

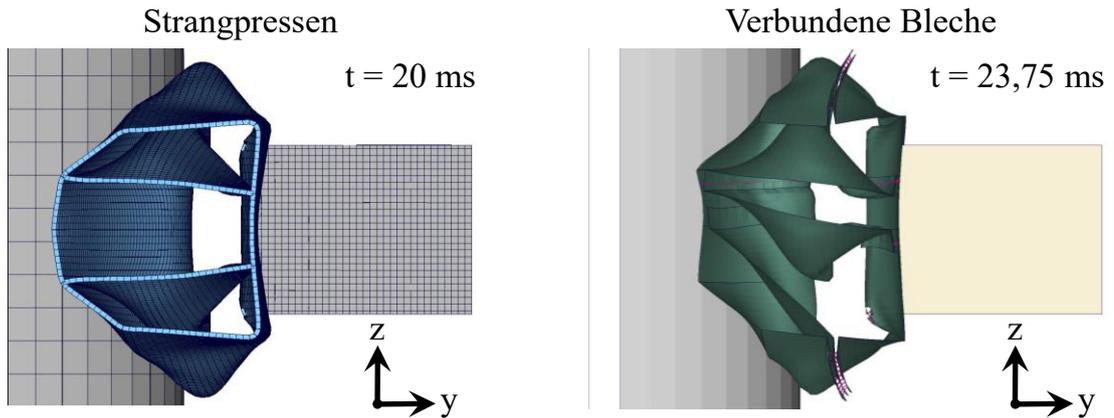


Abbildung 10-24: Maximale Deformation der besten Entwürfe bei der Minimierung der maximalen Kontaktkraft – Strangpressen mit Visualisierung der Wandstärke (Ortmann et al. 2021)

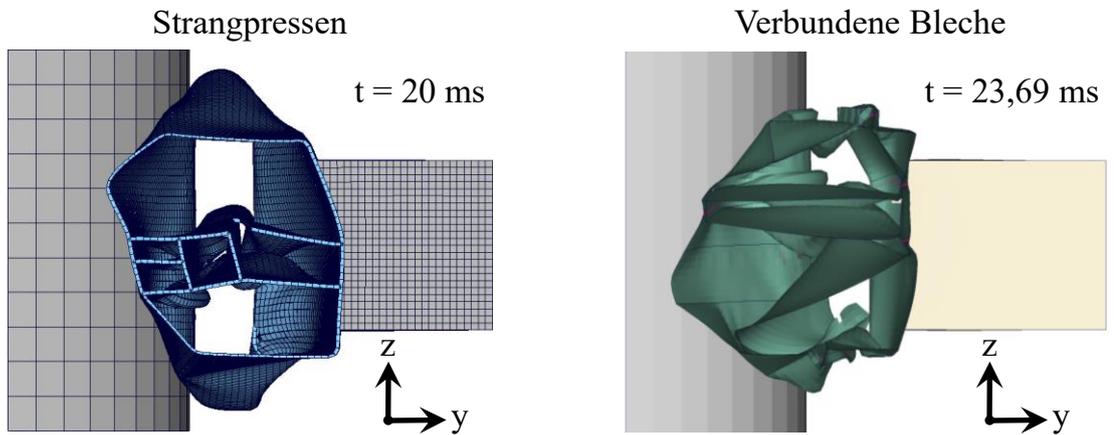


Abbildung 10-25: Maximale Deformation der besten Entwürfe bei der Minimierung der Masse – Strangpressen mit Visualisierung der Wandstärke (Ortmann et al. 2021)

11 Zusammenfassung

In dieser Dissertation wurde eine Methode zur Topologieoptimierung von crashbelasteten Profilstrukturen aus verbundenen Blechen entwickelt. Als Grundlage diente die bereits bestehende Software der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung, die sich bislang auf Extrusionsprofile beschränkt. Diese Software wurde zunächst um Algorithmen erweitert, um Extrusionsprofile in Profilstrukturen aus verbundenen Blechen zu überführen (s. Kapitel 5). Herausforderungen dabei sind die Beschreibung der Profilstruktur durch Bleche und das sinnvolle Anordnen der Bleche der Profilstruktur.

Mit den entwickelten Fertigungsrestriktionen für das Schwenkbiegen kann die Herstellbarkeit der Bleche für einen vereinfachten Schwenkbiegeprozess sichergestellt werden (Abschnitt 7.3). Dafür wird auf Kollisionen zwischen dem Blech und dem Bauraum des Biegewerkzeugs geprüft. Die Überprüfung findet für jeden Biegeschritt jedes Blechs einer Profilstruktur statt.

Die implementierten Fertigungsrestriktionen für den Fügeprozess berücksichtigen ein Punkt- und Laserstrahlschweißen der Fügestellen der Bleche an eigens dafür vorgesehenen Flanschen miteinander. Mit der Überprüfung der Zugänglichkeit unter verschiedenen Winkeln der Fügewerkzeuge wird die Erreichbarkeit der Fügestellen für den jeweiligen Fügeprozess sichergestellt (s. Abschnitt 7.4). Die Zugänglichkeit zu den Fügestellen wird geprüft, um die Fügbarkeit und die Fügereihenfolge eines Profils zu bestimmen (s. Abschnitt 7.5).

Die Modellierung der Fügeverbindung findet mit eindimensionalen Balkenelementen statt, die zwei Bleche an FE-Knoten miteinander verbinden. Entlang der Flansche werden in Axialrichtung des Profils mehrere Balkenelemente erzeugt, die somit die unterschiedlichen Schweißverbindungen abbilden. Die Festigkeit der Schweißverbindungen wird in Abhängigkeit von der Dicke der Flanschpaarung der jeweiligen Fügestelle und der Zugfestigkeit des Bauteilwerkstoffs berechnet (s. Kapitel 6). Das Versagen der Schweißverbindung wird durch eine maximal zulässige Scherzugkraft und Kopfzugkraft beschrieben. Sobald eine dieser Kräfte überschritten ist, wird die dazugehörige Schweißverbindung im Simulationsablauf entfernt.

Die eigens für die Optimierung von Profilstrukturen aus verbundenen Blechen entwickelten Heuristiken bewirken gleichzeitig eine strukturmechanische und fertigungstechnische Verbesserung der generierten Entwürfe (s. Abschnitt 8.2). Die durchgeführten Optimierungen zeigen, dass die Entwürfe, die mit den neu erzeugten Heuristiken

generiert wurden, oft zu den besten Entwürfen jeder Iteration gehören. In der Optimierung in Abschnitt 10.2.3 wurden 9 von 18 der besten drei Entwürfe jeder Iteration der Optimierung durch mindestens eine der neuen Heuristiken erzeugt. Der optimale Entwurf dieser Optimierung wurde ebenfalls mit einer der neuen Heuristiken generiert. Die entwickelte Optimierungsstrategie für *vielversprechende Entwürfe* ermöglicht es zunächst nicht fertiggabare Entwürfe in die nächste Iteration zu überführen, sofern sie dort durch die Heuristiken so angepasst werden, dass sie wieder fertigbar sind (s. Abschnitt 9.3). Dies ist vor allem nach der ersten Topologieänderung bedeutsam, da der Großteil der dort generierten Entwürfe zunächst nicht ffügbar ist und dementsprechend aussortiert werden würde.

Zusätzlich wurde eine Dimensionierungsstrategie der Profilstrukturen mit einer Entwurfsvariablen pro Blech entwickelt (s. Abschnitt 9.2). Dadurch kann das Optimierungspotenzial noch weiter ausgeschöpft werden, jedoch steigt die Anzahl der benötigten Funktionsaufrufe an. Die Empfehlung ist hier, die Bewertung aller Entwürfe der Optimierung durch eine Dimensionierung mit nur einer Entwurfsvariablen durchzuführen und für den besten Entwurf der Optimierung eine Dimensionierung mit einer Blechdicke für jedes Blech vorzunehmen.

Die Optimierungen des Schwellers im seitlichen Pfahlaufprall zeigen, dass die Kombination von Fertigungsrestriktionen und Heuristiken für Profile aus verbundenen Blechen sehr gute Ergebnisse liefert und das Optimierungspotenzial nahezu ausgeschöpft wird (s. Abschnitt 10.2). Bei der Minimierung der maximalen Kontaktkraft unter Berücksichtigung einer Intrusionsrestriktion ist eine Reduzierung der Kontaktkraft um 30,8 % möglich (s. Abschnitt 10.2.2).

Bei der Minimierung der Masse des Schwellers unter Berücksichtigung einer Kraftrestriktion konnte die Masse um 45,4% reduziert werden. Vor allem die in dieser Arbeit entwickelte Dimensionierungsstrategie hat einen großen Beitrag zur Reduzierung des Gewichts leisten können, da dadurch eine zusätzliche Gewichtsersparnis von 18,6% erreicht wurde (s. Abschnitt 10.3).

Der Vergleich mit dem Fertigungskonzept Strangpressen zeigt, dass bei einem identischen Optimierungsproblem deutlich unterschiedliche optimale Topologien für Profilstrukturen aus verbundenen Blechen entstehen (s. Abschnitt 10.4).

12 Ausblick

Die in dieser Dissertation entwickelte Methode kann in der industriellen Entwicklung von lateral crashbelasteten Profilstrukturen der Fahrzeugkarosserie eingesetzt werden. Dort kann sie bei der Entwicklung unterstützen, die Entwurfsvielfalt erhöhen, eine weitere Ausschöpfung des Verbesserungspotenzials ermöglichen und die Entwicklungszeiten deutlich reduzieren. Im Folgenden werden weitere Forschungspunkte der Methode genannt, die während der Arbeit aufgekommen sind, jedoch bislang nicht umgesetzt wurden.

Obwohl eine hohe Gewichtseinsparung erzielt wurde, ist eine Minimierung der Masse als Optimierungsziel bei Profilen aus verbundenen Blechen eine Herausforderung, da die Anzahl der Flansche bei komplexeren Topologien steigt und die Flansche aufgrund ihrer sehr lokalen Aufdickung im Vergleich zum Rest der Struktur mechanisch einen geringeren Beitrag zur Erfüllung des Optimierungsziels leisten. Hier hat das Fertigungsverfahren Strangpressen einen Vorteil, weil diese Problematik dort nicht auftritt, jedoch können dort keine hochfesten Materialien verwendet werden. In Zukunft sind Heuristiken vorstellbar, die Flansche positionieren, um so die auftretenden lokalen Versteifungen bestmöglich nutzen zu können.

In einer Untersuchung wurde der Einfluss der Fertigungsrestriktionen für das Biegeumformen der Bleche auf die in der Optimierung entstehenden Entwürfe untersucht (s. Abschnitt 10.2.3). Ein Deaktivieren dieser Fertigungsrestriktionen führt vereinzelt zu komplexeren Entwürfen, die nicht mit Schwenkbiegen hergestellt werden können. Diese Entwürfe können jedoch nach ersten Einschätzungen mit dem Rollformen (Halmos 2006) hergestellt werden und versprechen mit eigens dafür entwickelten Heuristiken und Fertigungsrestriktionen ein großes Potenzial. Die Weiterführung der Forschung in diesem Bereich wird als vielversprechend bewertet.

Bei der Bestimmung der inneren Blechpfade eines Profils mit dem Dijkstra-Algorithmus wird die Länge der Pfade als bewertendes Kriterium verwendet (s. Kapitel 5). Hier sollte weiter untersucht werden, ob es sinnvoll ist, zusätzlich die Anzahl der nötigen Biegekanten als Kriterium zu verwenden, um die Komplexität der Bleche besser bewerten zu können.

Die durch den Schweißprozess bedingten Wärmeeinflusszonen an den Fügstellen sollen zukünftig automatisch erzeugt und die dadurch veränderlichen Materialeigenschaften in der Simulation sollten berücksichtigt werden. Das Gleiche gilt für die Radien im Umformungsprozess der Bleche, die zukünftig modelliert werden sollten und deren

Materialverfestigung auch in die Simulation einbezogen werden sollte. Weiterhin ist es fertigungstechnisch sinnvoll, die Blechdicken einer Fügeverbindung einzuschränken, da zu große Blechdickenunterschiede beim Schweißen problematisch sein können. Dazu kann eine geometrische Fertigungsrestriktion erzeugt werden, die genau dies berücksichtigt und die Entwurfsvariablen in der Dimensionierung dementsprechend einschränkt.

Eine weitere Fügetechnik, die im Karosseriebau eine wichtige Rolle spielt, ist das Strukturkleben. Dementsprechend kann über eine Erweiterung beim Fügen von Blechen mittels Strukturkleben nachgedacht werden. Dies ist hauptsächlich interessant bei größeren Flanschen, die beim Verbinden von zwei Blechpfaden entstehen. Das Strukturkleben kann alleine oder in Kombination mit Schweißpunkten durchgeführt werden.

Eine Kollisionsüberprüfung beim geometrischen Zusammenbau der Profilstrukturen wird aktuell nicht verwendet, da die Komplexität der einzelnen Bleche zum Großteil so gering ist, dass ein lateraler Zusammenbau fast immer möglich ist. Aufgrund des konstanten Querschnitts ist ein axiales Ineinanderschieben der Komponenten mit ausreichenden Toleranzen prinzipiell auch vorstellbar, jedoch nicht praktikabel. Deswegen ist es wünschenswert, einen lateralen Zusammenbau in Zukunft zu berücksichtigen, da dieser besonders bei komplexeren Strukturen relevant wird, weil sie ineinander verschachtelt sein können.

Um die Bauteilkosten in der GHT zu berücksichtigen könnte eine Kostenfunktion implementiert werden. Damit können beispielsweise die Kosten für unterschiedliche Fertigungsverfahren, für die Fügeverfahren, für das benötigte Material und für die Anzahl an Fügstellen berücksichtigt werden. Diese Kostenfunktion könnte auch in der Optimierung minimiert werden, um möglichst preisgünstige Strukturen zu erhalten, die die Anforderungen erfüllen.

Aus den durchgeführten Optimierungen ist zu erkennen, dass Entwürfe mit neuen Wänden senkrecht zur Hauptlastrichtung meistens früh verworfen wurden, da sie in dem verwendeten Anwendungsbeispiel im Vergleich zu Entwürfen mit Wänden in Richtung der Hauptlastrichtung schlechter abschnitten. Dieser Sachverhalt trat besonders nach der ersten Topologieänderung auf. Danach ist es unwahrscheinlicher, erneut Topologieänderungen mit senkrecht zur Hauptlastrichtung laufenden Wänden zu erzeugen, da es den Entwürfen zu diesem Zeitpunkt deutlich erschwert wird, die Fertigungsrestriktionen zu erfüllen. Dieser Sachverhalt sollte weiter untersucht werden und bei Bedarf kann eine neue Heuristik eine Topologieänderung senkrecht zur Hauptlastrichtung vorschlagen, bei der gleichzeitig die Fügbarkeit des Profils berücksichtigt wird.

Literaturverzeichnis

- Alem, Nabih; Perry, Matthew (1995): Design of digital low-pass filters for time-domain recursive filtering of impact acceleration signals.
- Antonio, Franklin (1992): Faster line segment intersection. In: *Graphics Gems III (IBM Version)*: Elsevier, S. 199–202.
- Bendsøe, Martin P.; Kikuchi, Noboru (1988): Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. In: *Comp Methods Appl Mech Eng* 71, S. 197–224. DOI: 10.1016/0045-7825(88)90086-2.
- Beyer, F.; Schneider, D.; Schumacher, A. (2021): Finding three-dimensional layouts for crashworthiness load cases using the graph and heuristic based topology optimization. In: *Struct Multidisc Optim* 63, S. 59–73. DOI: 10.1007/s00158-020-02768-0.
- Braess, Hans-Hermann (2011): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 6. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (ATZ/MTZ-Fachbuch).
- Chao, Yuh J. (2003): Ultimate Strength and Failure Mechanism of Resistance Spot Weld Subjected to Tensile, Shear, or Combined Tensile/Shear Loads. In: *Journal of Engineering Materials and Technology* 125 (2), S. 125–132. DOI: 10.1115/1.1555648.
- Clemens, Philipp; Schumacher, Axel (2023): Nested loop approach for topology and shape optimization of crash-loaded deep-drawn components using contact forces for the inner loops. In: *Structures* 55, S. 2013–2022. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.06.015.
- Cormen, Thomas H.; Leiserson, Charles Eric; Rivest, Ronald Linn; Stein, Clifford (2009): *Introduction to algorithms*. 3. Aufl. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Cui, Lihu; Qiu, Ranfeng; Hou, LongLong; Shen, Zhongbao; Li, Qingzhe (2015): Resistance Spot Welding between Steel and Aluminum Alloy. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering*, 2015. Paris: Atlantis Press.
- Czerwinski, Frank (2011): *Welding and Joining of Magnesium Alloys*. In: Frank Czerwinski (Hg.): *Magnesium Alloys - Design, Processing and Properties*: In-Tech.
- Decker, Karl-Heinz; Kabus, Karlheinz (2018): *Maschinenelemente*. Unter Mitarbeit von Frank Rieg, Frank Weidemann, Gerhard Engelken, Reinhard Hackenschmidt und Bettina Alber-Laukant. 20. Aufl. München: Hanser.
- Dienemann, Robert (2018): *Entwicklung einer Optimierungsmethodik für die Form- und Topologieoptimierung von tiefziehbaaren Blechstrukturen*. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal.

- Dietrich, Jochen (2018): Praxis der Umformtechnik. 12. Aufl. Wiesbaden: Springer-Vieweg.
- Dijkstra, E. W. (1959): A note on two problems in connexion with graphs. In: *Numerische Mathematik* 1, S. 269–271. DOI: 10.1007/BF01386390.
- Doege, Eckart (2016): Handbuch Umformtechnik. Grundlagen, Technologien, Maschinen. 3. Aufl. Berlin: Springer-Vieweg.
- Eschenauer, H. A.; Kobelev, V. V.; Schumacher, A. (1994): Bubble method for topology and shape optimization of structures. In: *Struct Multidisc Optim* 8, S. 42–51. DOI: 10.1007/BF01742933.
- ESI Group (2021): Virtual Performance Solution 2021.01 - Reference Manual (Solver). Online verfügbar unter <https://myesi.esi-group.com/downloads/software-documentation/virtual-performance-solution-2021.01-reference-manual-solver-online>.
- EURO NCAP (2024): The European New Car Assessment Programme. Online verfügbar unter <https://www.euroncap.com/>.
- Fang, Jianguang; Sun, Guangyong; Qiu, Na; Kim, Nam H.; Li, Qing (2017): On design optimization for structural crashworthiness and its state of the art. In: *Struct Multidisc Optim* 55, S. 1091–1119. DOI: 10.1007/s00158-016-1579-y.
- Gullino, Alessio; Matteis, Paolo; D’Aiuto, Fabio (2019): Review of Aluminum-To-Steel Welding Technologies for Car-Body Applications. In: *Metals* 9, S. 315. DOI: 10.3390/met9030315.
- Halmos, George T. (2006): Roll forming handbook. Boca Raton: CRC Press.
- Huland, Stefanie; Möller, Michaela; Franke, Michael; Vakalopoulos, Tonio (2015): The electrification of the Passat, the GTE. Online verfügbar unter <http://www.viavision.org.uk/ftp/1794.pdf>.
- Hunkeler, Stephan; Duddeck, Fabian; Rayamajhi, Milan (2013): Topology optimization method for crashworthiness design using Hybrid Cellular Automata and thin-walled ground structures. Hg. v. 9th European LS-DYNA Conference. Manchester.
- Karger, D.; Motwani, R.; Ramkumar, G. D. S. (1997): On approximating the longest path in a graph. In: *Algorithmica* 18, S. 82–98. DOI: 10.1007/BF02523689.
- Katayama, Seiji (2020): Fundamentals and Details of Laser Welding. Singapore: Springer Singapore.
- Kimchi, Menachem; Phillips, David H. (2018): Resistance Spot Welding. Cham: Springer International Publishing.
- Kitani, Y.; Oi, K.; Tamai, Y. (2015): Application of laser welding technologies to automotive bodies. Hg. v. JFE Steel Corporation.
- Klein, Bernd; Gänssicke, Thomas (2019): Leichtbau-Konstruktion. Dimensionierung, Strukturen, Werkstoffe und Gestaltung. 11. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.

- Kusuda, Yoshihiro (2013): Honda develops robotized FSW technology to weld steel and aluminum and applied it to a mass-production vehicle. In: *Industrial Robot* 40, S. 208–212. DOI: 10.1108/01439911311309889.
- Laue, Kurt; Stenger, Helmut (1976): Strangpressen. Verfahren, Maschinen, Werkzeuge. Düsseldorf: Aluminium-Verlag.
- Ling, Zhanxiang; Li, Yang; Luo, Zhen; Feng, Yueqiao; Wang, Zhengmin (2016): Resistance Element Welding of 6061 Aluminum Alloy to Uncoated 22MnMoB Boron Steel. In: *Materials and Manufacturing Processes* 31, S. 2174–2180. DOI: 10.1080/10426914.2016.1151044.
- Link, Simon; Schneider, Dominik; Schumacher, Axel; Ortmann, Christopher (2019): Integration of Flange Connections in the Graph and Heuristic Based Topology Optimization of Crashworthiness Structures. In: H. C. Rodrigues, J. Herskovits, C. M. Mota Soares, A. L. Araújo, J. M. Guedes, J. O. Folgado et al. (Hg.): EngOpt 2018 Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Optimization. Cham: Springer International Publishing, S. 619–631.
- LS-OPT manual (2021): LS-OPT 6.0 User's Manual. Online verfügbar unter https://www.lsoptsupport.com/documents/manuals/ls-opt/lsopt_60_manual.pdf.
- LS-TaSC manual (2018): LS TaSC User's Manual Version 4. Online verfügbar unter https://www.lsoptsupport.com/documents/manuals/ls-tasc/ls-tasc-4-0-manuals/user_manual.pdf.
- Maw, Isaac (2018): The Battle of the Bodies: Steel vs. Aluminium in Automotive Production. Online verfügbar unter <https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/16437/The-Battle-of-the-Bodies-Steel-vs-Aluminum-in-Automotive-Production.aspx>, zuletzt geprüft am 17.03.2024.
- Mei, Lifang; Yan, Dongbing; Chen, Genyu; Wang, Zhenhui; Chen, Shuixuan (2017): Influence of laser beam incidence angle on laser lap welding quality of galvanized steels. In: *Optics Communications* 402, S. 147–158. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.05.032.
- National Physical Laboratory (2000): Bimetallic Corrosion. Guides to Good Practice in Corrosion Control No.5. Hg. v. National Physical Laboratory.
- Ortmann, Christopher (2015): Entwicklung eines graphen- und heuristikbasierten Verfahrens zur Topologieoptimierung von Profilquerschnitten für Crashlastfälle. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal.
- Ortmann, Christopher; Schumacher, Axel (2013): Graph and heuristic based topology optimization of crash loaded structures. In: *Struct Multidisc Optim* 47, S. 839–854. DOI: 10.1007/s00158-012-0872-7.
- Ortmann, Christopher; Sperber, Johannes; Schneider, Dominik; Link, Simon; Schumacher, Axel (2021): Crashworthiness design of cross-sections with the Graph and Heuristic based Topology Optimization incorporating competing designs.

- In: *Structural and multidisciplinary optimization* 64, S. 1063–1077. DOI: 10.1007/s00158-021-02927-x.
- Palmonella, Matteo; Friswell, Michael; Mottershead, John; Lees, Arthur (2005): Finite element models of spot welds in structural dynamics: Review and updating. In: *Computers & Structures - Comput Struct* 83. DOI: 10.1016/j.compstruc.2004.11.003.
- Papula, Lothar (2014): *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 1*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Park, Gyung-Jin (2011): Technical overview of the equivalent static loads method for non-linear static response structural optimization. In: *Struct Multidisc Optim* 43, S. 319–337. DOI: 10.1007/s00158-010-0530-x.
- Patel, Neal M.; Kang, Byung-Soo; Renaud, John E.; Tovar, Andrés (2009): Crashworthiness Design Using Topology Optimization. In: *Journal of Mechanical Design* 131. DOI: 10.1115/1.3116256.
- Pedersen, C. B. W. (2003a): Topology optimization design of crushed 2D-frames for desired energy absorption history. In: *Struct Multidisc Optim* 25, S. 368–382.
- Pedersen, C. B. W. (2003b): Topology optimization for crashworthiness of frame structures. In: *International Journal of Crashworthiness* 8, S. 29–39. DOI: 10.1533/ijcr.2003.0218.
- Pouranvari, M.; Marashi, S. P. H. (2013): Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties. In: *Science and Technology of Welding and Joining* 18, S. 361–403. DOI: 10.1179/1362171813Y.0000000120.
- ras-online (2020): Schwenkbiegen. Online verfügbar unter <https://www.ras-online.de>.
- Rozvany, G. I. N.; Zhou, M.; Birker, T. (1992): Generalized shape optimization without homogenization. In: *Struct Multidisc Optim* 4, S. 250–252. DOI: 10.1007/BF01742754.
- Schneider, Dominik (2023): Graphen- und heuristikbasierte Topologieoptimierung von Profilstrukturen aus Faser-Kunststoff-Verbunden in Craschanwendungen. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal.
- Schumacher, Axel (2020): *Optimierung mechanischer Strukturen. Grundlagen und industrielle Anwendungen*. 3. Aufl. Berlin: Springer Berlin.
- Sperber, Johannes (2022): Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung axial belasteter Crashstrukturen. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal.
- Triller, J.; Immel, R.; Timmer, A.; Harzheim, L. (2021): The difference-based equivalent static load method: an improvement of the ESL method’s nonlinear approximation quality. In: *Struct Multidisc Optim* 63, S. 2705–2720. DOI: 10.1007/s00158-020-02830-x.
- Triller, Jens (2023): *Crashworthiness Optimization using difference-based equivalent static Loads - Sizing and Topology Optimization of Structures subjected to Crash*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt.

Weider, Katrin (2021): Topologische Ableitung zur Optimierung crashbelasteter Strukturen. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal.

Beigetragene studentische Arbeiten

Teichmann, Leon-Winnie (2020): Entwicklung von Heuristiken zur Erzeugung von Blechstrukturen für die Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung. Masterarbeit. Bergische Universität Wuppertal.

Anhang A

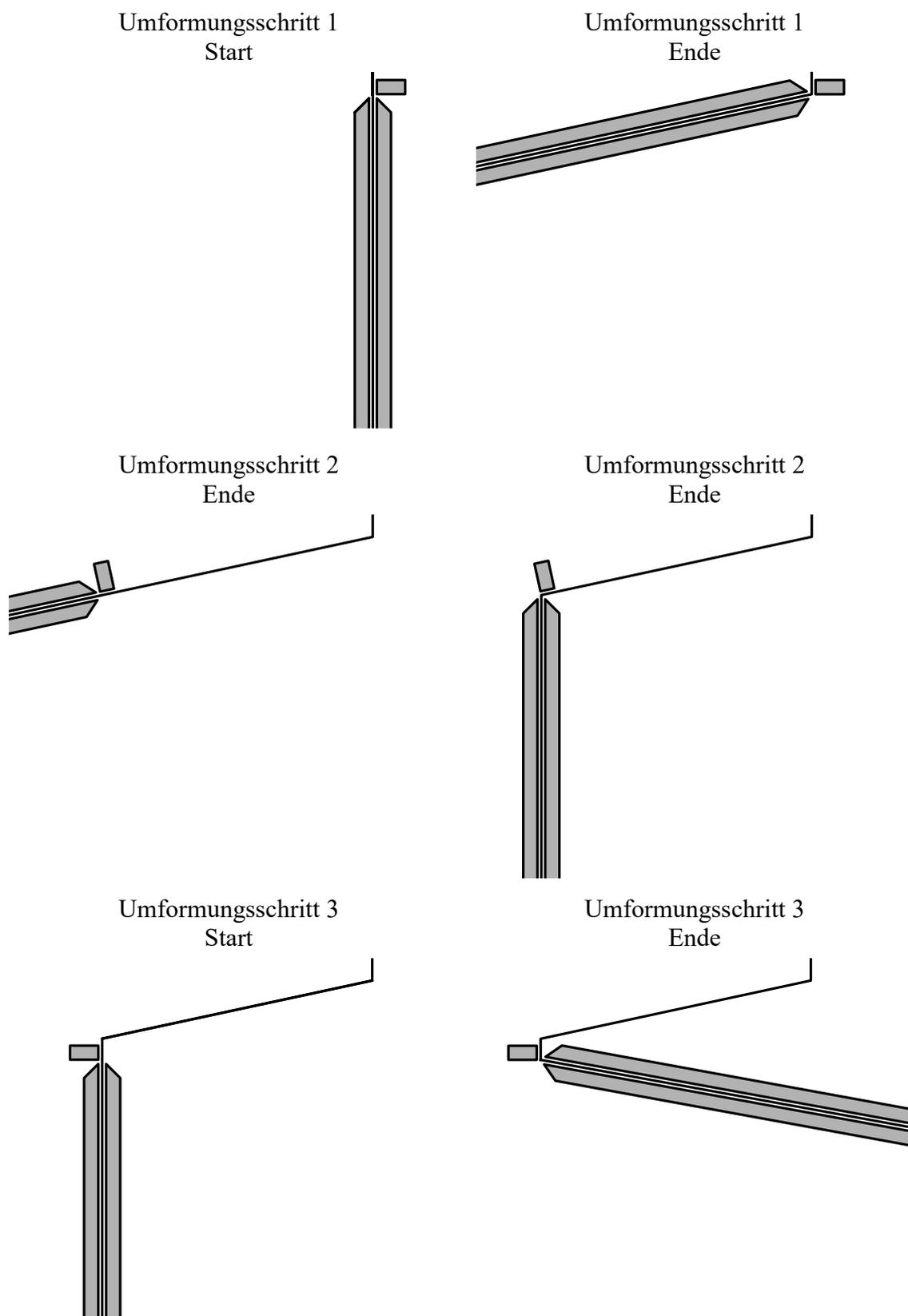


Abbildung A-1: Umformungsschritte 1 bis 3 mit Kollisionsüberprüfung für ein Trapezprofil mit stark vereinfachtem Umformungswerkzeug

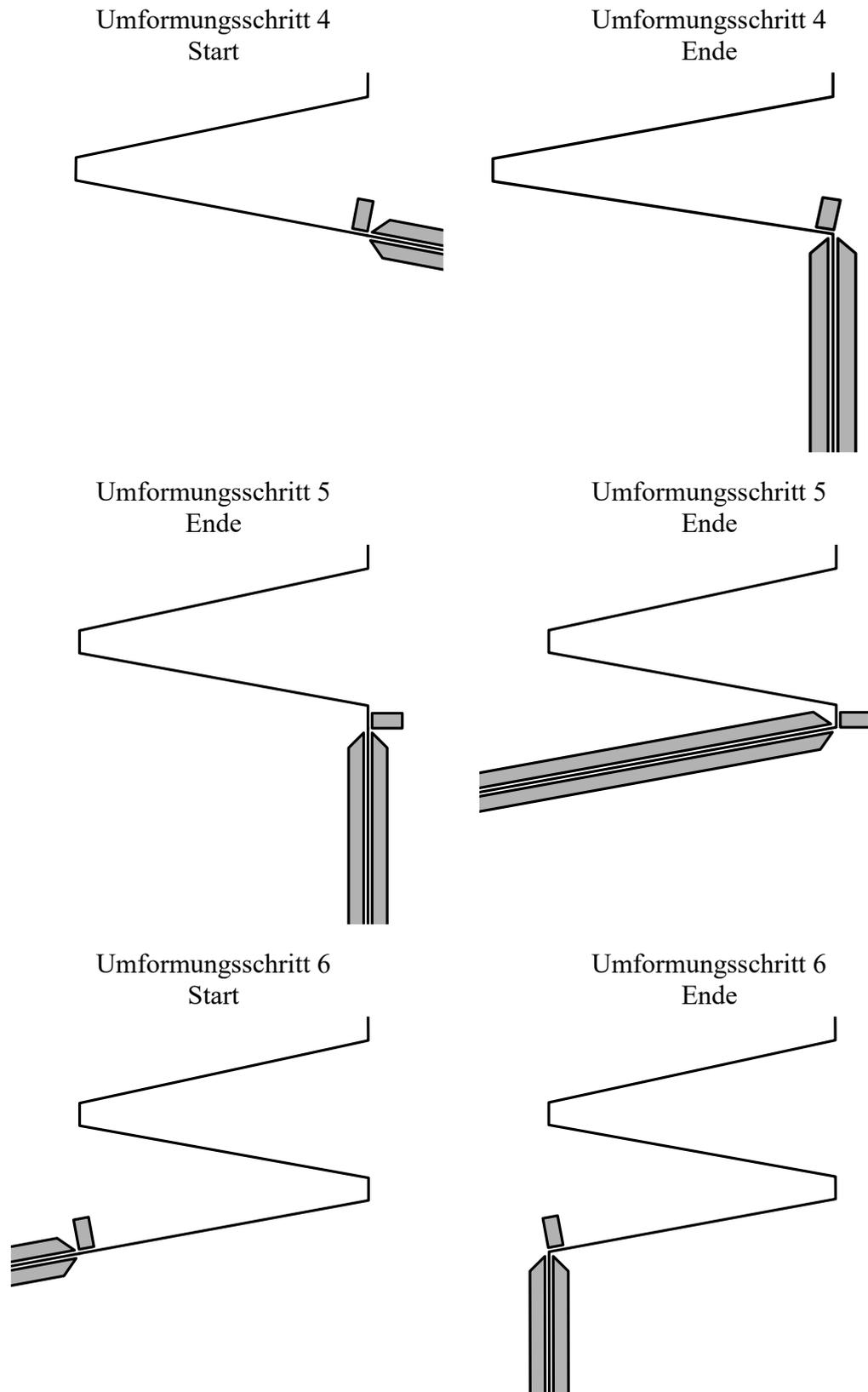


Abbildung A-2: Umformungsschritte 4 bis 6 mit Kollisionsüberprüfung für ein Trapezprofil mit stark vereinfachtem Umformungswerkzeug

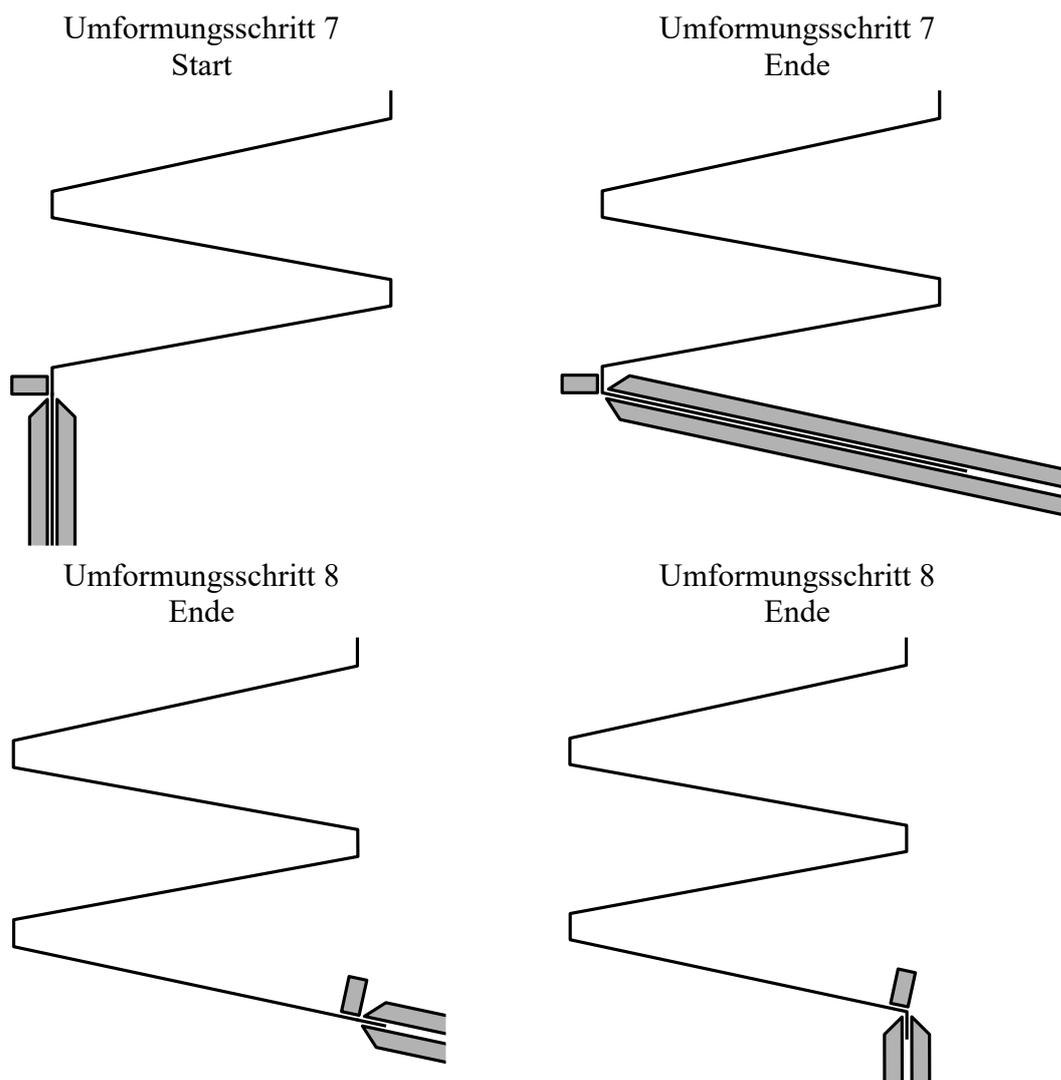


Abbildung A-3: Umformungsschritte 7 bis 8 mit Kollisionsüberprüfung für ein Trapezprofil mit stark vereinfachtem Umformungswerkzeug

Lebenslauf

Persönliches

Simon Link
Geburtsort: Wuppertal
Geburtsdatum: 30.03.1988
Familienstand: ledig

Schulbildung

1998 bis 2008 Gymnasium am Kothen, Wuppertal

Studium

10/2008 bis 03/2013 Studium Bachelor of Science Maschinenbau an der Bergischen Universität Wuppertal
10/2013 bis 04/2016 Studium Master of Science Maschinenbau an der Bergischen Universität Wuppertal
Seit 05/2016 Promotionsstudium an der Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik an der Bergischen Universität Wuppertal

Berufstätigkeit

02/2009 bis 05/2009 Praktikum in der Qualitätssicherung und Fertigung bei FAG – Schaeffler
05/2012 bis 04/2016 Werkstudent im Bereich Konstruktion und Entwicklung bei Magna Powertrain
Seit 05/2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen an der Bergischen Universität Wuppertal, Forschungsschwerpunkt: Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung

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 Ramsaier (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
14. Dr.-Ing. Florian Beyer (2024): Entwicklung eines Optimierungsverfahrens für crashbelastete 3D-Rahmenstrukturen mit der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-9475-6
15. Dr.-Ing. Michail Schlosser (2024): Optimierungsverfahren zur Erhöhung der Versagenslasten von Bolzenverbindungen in faserverstärkten Strukturen, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-9411-4
16. Dr.-Ing. Jens Trilling (2024): Unterstützung der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung crashbelasteter Strukturen durch Reinforcement Learning, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-9554-8
17. Dr.-Ing. Philipp Clemens (2024): Topologie- und Formoptimierung crashbeanspruchter Tiefziehblech-Bauteile, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-9962-1

