

Automatische Erstellung von Drahtgittermodellen aus Topologieoptimierungen

Automatic Generation of Wireframe Models from Topology Optimizations

Christian Gomes Alves¹, Tjark Siefkes²

¹Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart
christian.gomesalves@dlr.de

²Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart
tjark.siefkes@dlr.de

Abstract (deutsch): Die Erstellung von CAD-Strukturen aus Topologieoptimierungsergebnissen ist ein ingenieurstechnisch aufwändiger und damit zeit- und kostenintensiver Schritt in vielen Produktentwicklungsprozessen. In diesem Beitrag wird eine neue Methode vorgestellt, die diesen Prozessschritt automatisiert und so wesentlich beschleunigen kann. Nach einer initialen Voxelisierung des FE-Netzes wird das topologische Modell ausgedünnt. Um die Topologie abzubilden, werden anschließend Strukturknoten erkannt, mit Linien verbunden und geglättet. Am Ende steht ein Drahtgittermodell aus Punkten und Linien, das sich für parametrische top-down-Konstruktionen im CAD eignet. Die Methode hebt sich von anderen Arbeiten auf diesem Gebiet durch die Verwendung eines Voxelmodells zur Diskretisierung von FE-Modellen ab. Dadurch werden die nachfolgenden Schritte unabhängig vom ursprünglichen Netz aus finiten Elementen und es können effiziente Bildverarbeitungsalgorithmen eingesetzt werden. Das Verfahren wird beispielhaft auf einen Schienenfahrzeugwagenkasten angewandt, ist jedoch prinzipiell auf Topologieoptimierungsergebnisse von Bauteilen aus vielen Disziplinen anwendbar.

Keywords (deutsch):

Topologieoptimierung, Bildverarbeitung, virtueller Produktentwicklungsprozess

Abstract (English): The generation of CAD structures from topology optimization results is a complex and therefore time and cost intensive step in many product development processes. In this paper, a new method is presented which automates this step and can thus save significant time. After an initial voxelization of the FE-mesh, the topological model is thinned out. To map the topology, structural nodes are then detected, connected with lines and smoothed. The result is a wireframe model consisting of points and lines, which is suitable for parametric top-down designs in CAD. The method differs from other work in this field by using a voxel model to discretize FE models. This makes the subsequent steps independent from the original mesh of finite elements and allows the use of efficient image processing algorithms. The method is applied to a rail vehicle body, but, in principle, is applicable to topology optimization results of components from many disciplines.

Keywords (English):

Topology optimization, image processing, virtual product development process

1 Einleitung

Topologieoptimierungen (TO) halten immer mehr Einzug in moderne Produktentwicklungsprozesse. Bei TOs von großen Bauteilen, wie Schienenfahrzeugstrukturen, Flugzeugtragflächen oder organischen Gebäudestrukturen, entstehen oft komplexe und fachwerkartige Strukturen. Deren Interpretation und Übertragung in erste CAD-Konzepte können durch das Erstellen von Drahtgitterskeletten unterstützt werden. Die Erstellung solcher Skelette ist aufgrund der Komplexität der optimierten Strukturen aufwändig und damit kostenintensiv.

Industrie und Wissenschaft entwickeln bereits Lösungen, um Teile der damit verbundenen Tätigkeiten zu vereinfachen oder zu automatisieren (Altair Engineering Inc.; Larsen und Jensen 2009). Diese Lösungsansätze verwenden oft direkt das Netz aus finiten Elementen der TO, wodurch sie abhängig von dessen Netzqualität sind (Ju et al. 2007; Nana et al. 2017). Weitere Lösungen erstellen aus dem Netz Freiformflächen und überspringen die Drahtgitterskeletterstellung (Hsu und Hsu 2005; Koguchi und Kikuchi 2006; Lin und Chao 2000; Tang und Chang 2001). Skelette sind jedoch als Zwischenschritt vor dem eigentlichen CAD-Modellieren sinnvoll, um parametrisierbare Modelle zu erstellen und so eine systematische Konstruktion, womöglich mit Standardteilen, zu ermöglichen.

In diesem Beitrag wird eine Prozesskette vorgestellt, die die Ableitung von Drahtgitterskeletten aus TOs von großen Komponenten mittels Voxelmodellen löst und so eine Auswertung ermöglicht, die von den Eigenschaften des finite Elemente Netzes unabhängig ist. Im Folgenden wird zunächst die Bedeutung von TOs im virtuellen Produktentwicklungsprozess herausgestellt sowie ihre Funktionsweise erläutert. Anschließend wird der manuelle Skeletterstellungsprozess analysiert bevor der automatisierte Prozess und die Einzelschritte hergeleitet werden. Die Anwendung der vorgestellten Prozesskette wird an einem Schienenfahrzeugwagenkasten demonstriert.

2 Topologieoptimierung im Produktentwicklungsprozess

Heutige Produktentwicklungen im Maschinen- und Fahrzeugbau kommen selten ohne eine virtuelle Repräsentation des Produktes aus. Der virtuelle Produktentwicklungsprozess ist mittlerweile selbst in kleinen und mittelständischen Unternehmen in verschiedenen Ausprägungen Standard (Bild 1). Entwicklerteams stehen mit Verfahren wie Mehrkörpersimulation, Finite Elemente Methode (FEM), Strukturoptimierung, Lebensdauerberechnung oder CAD-Modellierung viele Möglichkeiten zur Verfügung, um Bauteile und Systeme noch vor dem ersten Prototypen umfänglich auszulegen. Die Produkte werden so kostengünstiger, leichter und sicherer.

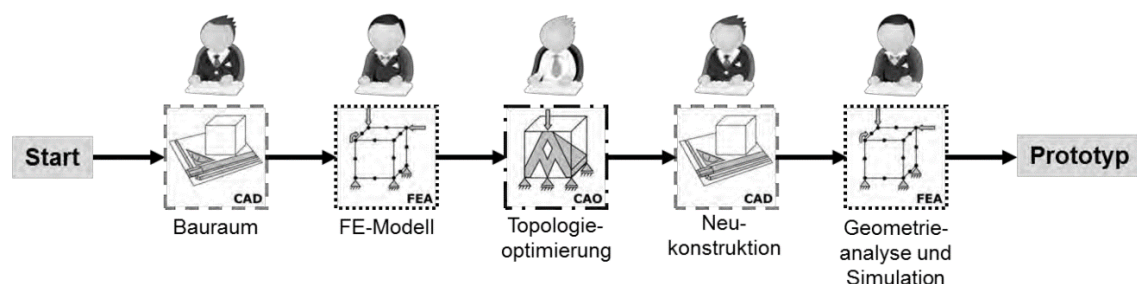


Bild 1: Virtueller Produktentwicklungsprozess mit TO in mittelständischen Unternehmen (Frisch et al. 2016)

Einen immer wichtiger werdenden Baustein für Leichtbau und somit auch Rohstoffeinsparung in der frühen Produktentwicklungsphase stellen TOs mittels FE-Simulationen dar. Sie erleichtern es, kraftflussgerechte Strukturen mit höchsten Leichtbauansprüchen zu entwickeln. TOs haben seit verhältnismäßig kurzer Zeit Einzug in Produktentwicklungsprozesse gefunden. Mit steigenden Leichtbauanforderungen und verbesserter Nutzerfreundlichkeit werden sie sich künftig weiter verbreiten. Neben den reinen FEM-basierten Systemen bieten auch viele CAD-Anwendungen

mittlerweile integrierte Schnittstellen oder gar komplette Optimierungen an. Während dies die Durchführung einer TO vereinfacht, ist für die vollumfängliche Integration in den Produktentwicklungsprozess ein großes Fachwissen notwendig (Billenstein et al. 2017).

Das Ziel des Beitrags ist es, die Einbindung von TOs in den Produktentwicklungsprozess zu vereinfachen. Hierzu werden die notwendige Anwenderexpertise und der notwendige manuelle Aufwand für die Auswertung von TO-Ergebnissen und die Übertragung in CAD-Strukturen verringert.

2.1 Finite Elemente Methode

Die FEM ist ein numerisches Verfahren und wird im Maschinenbau häufig verwendet, um Spannungen und Verformungen in Bauteilen bei gegebenen Belastungen zu berechnen. Sie bildet die Grundlage für viele computerbasierte, strukturelle Untersuchungen und Optimierungen.

Um eine FE-Rechnung durchführen zu können, muss ein Bauteil mit einem Netz aus endlich kleinen (finiten) Elementen repräsentiert werden und es müssen Lagerungsbedingungen und aufgeprägte Kräfte/Beschleunigungen definiert werden. Ein finites Element besteht dabei, je nach Konfiguration, aus einer bestimmten Anzahl Eckpunkten (Knoten) im Raum, die ihm seine Form geben. Ein Dreieckselement ist mit drei Knoten räumlich und geometrisch definiert, ein Quader mit acht. Teilen sich zwei Elemente einen oder mehrere Knoten, dann sind sie miteinander verbunden und können Kräfte und Verformungen untereinander weiterleiten. Für jedes der finiten Elemente in einer Struktur werden in einer FE-Rechnung Systemantworten berechnet. Diese sind beispielsweise Verschiebungen im Raum, Spannungen oder Frequenzen.

Das Ergebnis einer FE-Rechnung sind sowohl lokale Spannungen und Verformungen als auch globale Steifigkeiten. So können Bauteile mit Hilfe von FE-Rechnungen etwa dimensioniert werden oder es kann ihre Festigkeit unter den gegebenen Lasten nachgewiesen werden. (Schumacher 2013)

2.2 Topologieoptimierung

Eine TO ist ein sehr allgemeines und flexibles Strukturoptimierungsverfahren. Es erlaubt die freie Veränderung des gesamten definierten Bauraums. Das Ziel einer TO ist es, Kraftflüsse innerhalb von Bauteilen zu identifizieren und so optimale Strukturen für die auf ein Bauteil wirkenden Lasten zu finden (Bild 2). Sie basiert auf der FEM. Die dort berechneten Systemantworten werden genutzt, um mit Hilfe von Optimierungsalgorithmen die Materialverteilung im gegebenen Bauraum anzupassen.

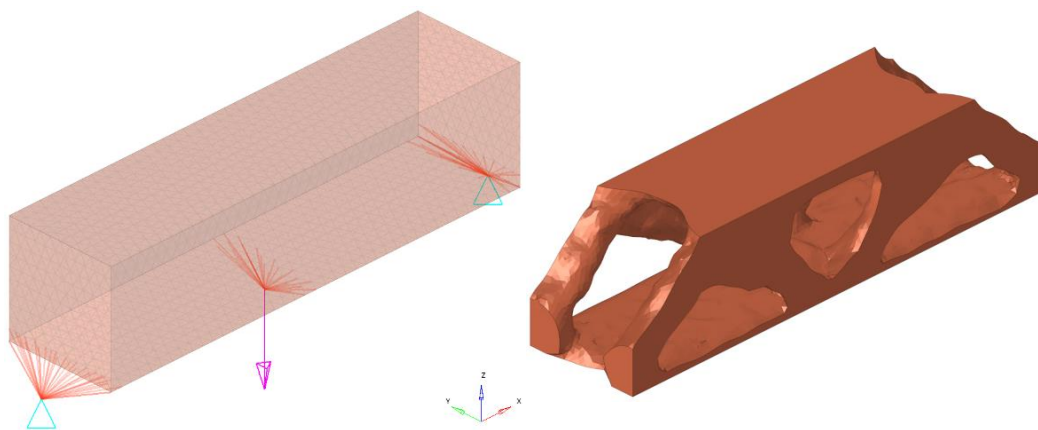


Bild 2: Topologieoptimierung einer einfachen Brücke: Bauraum (links) und Optimierungsergebnis (rechts)

Eine TO arbeitet mit einer Optimierungsschleife (Bild 3). Im Preprocessing wird der Bauraum eines Bauteils wie für eine FE-Rechnung vorbereitet. Zusätzlich wird eine Designvariable definiert, die während der Optimierung variiert wird. Außerdem wird das Optimierungsziel festgelegt (bspw. Masseminimierung oder Steifigkeitsmaximierung) sowie Nebenbedingungen angelegt (bspw. maximale Verformung). Mit dem FE-Solver werden die Systemantworten im Bauteil berechnet. Diese

dienen dem Optimierungsalgorithmus als Eingangsdaten. Er verändert unter Berücksichtigung von Systemantworten, Zielfunktion und Nebenbedingungen den Bauraum so, dass die Randbedingungen besser erfüllt werden. Diese optimierte Struktur wird einer erneuten FE-Berechnung unterzogen. Diese Optimierungsschleife wird so lange durchlaufen bis ein Konvergenzkriterium für das Optimierungsziel erreicht wird (bspw. Änderung der Masse zur vorigen Iteration). Ist das Konvergenzkriterium erfüllt, wird ein Designvorschlag ausgegeben. Im anschließenden Postprocessing wird der Designvorschlag analysiert, ausgewertet und weiterverarbeitet. (Sander et al. 2013; Schumacher 2013)

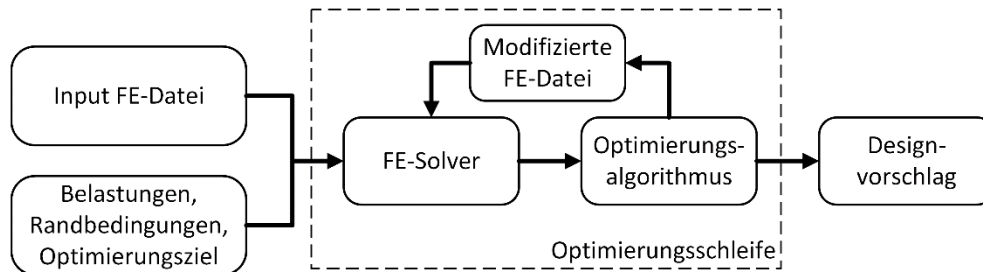


Bild 3: Typischer Topologieoptimierungsprozess (nach Sander et al. 2013)

Während der Optimierung wird die Designvariable so variiert, dass die Zielfunktion unter Einhaltung aller Nebenbedingungen maximiert oder minimiert wird. In einer TO ist die Designvariable die relative Materialdichte der finiten Elemente, das heißt die aktuelle Dichte bezogen auf die Ursprungsdichte (tatsächliche Dichte des Werkstoffs). Das heißt, die Designvariable kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Eine relative Materialdichte von 0 bedeutet, dass das finite Element keine Dichte besitzt. Es trägt nicht zur Steifigkeit der Gesamtstruktur bei. Bei einer relativen Dichte von 1 liegt Vollmaterial vor, das Element ist sehr wichtig für die Struktur. Das Ergebnis einer TO ist also eine Dichteverteilung des Materials im Bauteil, die Lastpfade innerhalb des Bauteils veranschaulicht. (Schumacher 2013)

So etabliert FE-Rechnungen und auch TO in vielen Produktentwicklungsprozessen bereits sind, so aufwendig ist deren Aus- und Bewertung nach wie vor. Die Information über die relative Dichteverteilung im Bauteil ist maschinenbautechnisch nicht ohne Weiteres verwendbar. Reale Werkstoffe haben eine feste Dichte, die sich in der Regel nicht frei variieren lässt. Die abstrakten Ergebnisse einer TO müssen also ganzheitlich strukturell ausgewertet werden, um die Erkenntnisse in eine fertigmögliche Konstruktion überführen zu können. Dieser anspruchsvolle und aufwändige Schritt erfordert viel Expertise und erfolgt nach wie vor hauptsächlich manuell durch erfahrene Ingenieurteams.

3 Vom manuellen zum automatisierten Prozess

Aufgrund der Komplexität beansprucht der Übergang zwischen TO und CAD-Konstruktion viel Zeit und Know-How. Auch kommerzielle Softwareanbieter haben das wirtschaftliche Potential erkannt, das sie ihren Kunden durch eine Vereinfachung dieses Prozessschritts bieten können. Die detaillierten Arbeitsweisen von kommerziell verfügbaren Programmen, die TOs und Geometrieerstellung kombinieren (beispielsweise TOSCA von Dassault Systèmes oder solidThinking und C123 von Altair Engineering), sind oft Firmengeheimnisse und somit dem wissenschaftlichen Diskurs nicht zugänglich. Ihre Funktionen sind zudem in der Regel stark eingeschränkt. Nichtsdestotrotz zeugt die Existenz von solchen kommerziellen Programmen davon, dass der Übergang von TOs hin zu CAD-Modellen ein wichtiges (und wirtschaftlich interessantes) Feld darstellt. (Cuillière et al. 2018)

Je größer die Struktur ist, die mit Hilfe einer TO optimiert werden soll, desto aufwändiger ist auch ihre Weiterverarbeitung. Schienenfahrzeugwagenkästen beispielsweise können eine Länge von über 28 m bei einer Höhe von bis zu 4 m und einer Breite von rund 3 m haben (DIN EN 15273 Teil 3 2017). Die TO-Strukturen ergeben bei qualitativ hochwertigen Optimierungen feine stabartige Strukturen und lassen sich somit als Fachwerk ansehen (vgl. Bild 2). Mit dieser Betrachtung wird es ermöglicht, die Konzeptkonstruktion aus Balkenelementen zusammenzusetzen, wodurch beispielsweise eine hohe

Gleichteildichte erreicht wird (König et al. 2012). Die Basis für solche Fachwerkkonstruktionen können Drahtgitterskelette bilden, deren Aufbau und Vorteile im folgenden Kapitel vorgestellt werden. Im darauffolgenden Kapitel wird ein üblicher Prozessablauf für die Überführung von TO-Ergebnissen hin zu CAD-Modellen beschrieben. Diese Beschreibung dient als Grundlage für die Analyse des Automatisierungspotentials.

3.1 Skelette bei der Erstellung von CAD-Modellen großvolumiger Komponenten

Es gibt verschiedene Strategien für den Aufbau und die Abhängigkeitsdefinition in großen und komplexen CAD-Strukturen, die aus mehreren verschachtelten Baugruppen und Bauteilen bestehen, die aufeinander referenzieren. Beim Top-Down-Vorgehen beispielsweise wird das Produkt von der Grobebene zur Feinebene definiert und modelliert. Das bedeutet, dass übergeordnet die groben Rahmenbedingungen die (Detail-)Konstruktionen vorgeben. Dies kann beispielsweise der gesamte Bauraum sein oder eine Grobstruktur, wie sie aus TOs abgelesen werden kann. In weiteren Produktentwicklungsphasen wird das Modell stets detaillierter, Bauteile werden hinzugefügt und auskonstruiert. Wichtig hierbei ist, dass die Einbaureferenz aller Bauteile letztlich nach oben zeigt und somit die anfängliche Grobstruktur die maßgebliche Referenz darstellt. (Feldhusen und Grote 2013) Gerade beim initialen Entwurf von Konzepten für große Strukturen, wie beispielsweise Schienenfahrzeugwagenkästen oder auch Flugzeugrümpfen und -tragflächen, sind Details der späteren Konstruktion gänzlich unbekannt. Hier ist der Einsatz von flexiblen und parametrischen Geometrieskeletten (Bild 4, rechts) im Top-Down-Vorgehen ideal, da sie eine schnelle Modellerstellung erlauben, ohne dass sich im Vorfeld Gedanken über Detailkonstruktionen gemacht werden muss (Ostrosi et al. 2020). Wenn im Vorfeld zur Konstruktion eine TO durchgeführt wurde, kann aus ihr ein Skelett abgeleitet werden. Es folgt dabei den Strukturen der TO (vgl. Bild 4) und dient als Basis für die weitere Modellierung. Es vereinfacht die Erstellung eines parametrischen Modells, bei dem die Geometrie auch nach erfolgter Detailkonstruktion einfach verändert werden kann (beispielsweise Änderung der Außenkontur oder Lage eines Skelettknotens). Dadurch ergeben sich automatische Anpassungen bei allen untergeordneten Baugruppen und -teilen. Die Ableitung eines Skeletts von einer TO kann also der erste und zentrale Schritt beim Übergang vom Prozessschritt der TO zum Prozessschritt der CAD-Modellierung sein.

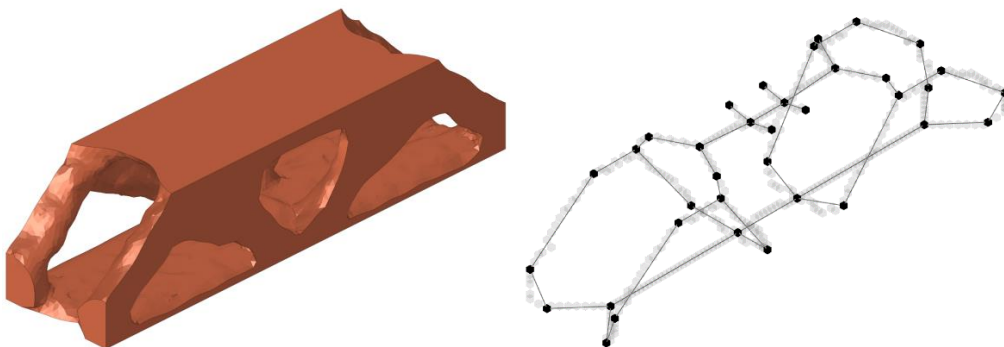


Bild 4: Topologieoptimierungsergebnis einer einfachen Brücke (links) und Drahtgitterskelett (rechts)

Ein Skelett (Bsp. Bild 4, rechts) besteht dabei in der Regel aus Punkten, Linien und eventuell Flächen und dient im späteren Entwicklungsprozess als Orientierung für das Erstellen höherer Geometrie, wie Volumenkörper. Den Linien können im späteren Verlauf Querschnitte oder Flächen Wanddicken gegeben werden. Der Fokus liegt jedoch zunächst auf der Skeletterstellung selbst.

3.2 Prozessablauf von Skelettableitungen

Für die manuelle Ableitung eines Skeletts aus TO-Ergebnissen ist fachliche Expertise aus zwei Disziplinen notwendig: FE-Berechnung und Konstruktion. Im Folgenden werden die Arbeitsschritte

dieser zwei Abteilungen beschrieben und deren Aufwand auf der Basis von drei Domänenexperten geschätzt. Tabelle 1 zeigt die Prozessschritte in der Übersicht mit Erfahrungswerten für die Dauer der manuellen Erstellung bezogen auf TOs von großen Komponenten, wie Schienenfahrzeugwagenkästen oder -fahrwerken.

Tabelle 1: Stundenbedarf bei manueller Skeletterstellung

Arbeitsschritt	Expertise	Dauer (h)
1. Aufarbeitung des TO-Ergebnisses & Export in Austauschformat	Berechnung	1-5
2. Import in CAD-Programm & ggf. initiale Geometriaufbereitung	Konstruktion	0,5-2
3. Skelettableitung	Konstruktion	8-14
	Gesamt	9,5-21

Im Detail enthalten die Prozessschritte folgende Tätigkeiten:

1. Die Berechnungsabteilung muss das Ergebnismodell der TO zunächst aufbereiten. Hierzu gehört die Auswahl eines geeigneten Elementdichtenschwellwerts, um aus der Materialdichteverteilung der TO eine konkrete Struktur zu erhalten. Elemente, deren relative Dichte unter dem Schwellwert liegen, werden ausgeblendet, sodass eine Struktur sichtbar wird. Danach erfolgt gegebenenfalls der Re-Import des TO-Ergebnisses in den Preprocessor, um das FE-Netz des Modells unter Umständen aufzubereiten, etwa durch Glättung der Oberfläche. Hierdurch wird die Elementqualität verbessert und idealerweise die Anzahl an Elementen verringert, um spätere Performanceprobleme zu vermeiden. Bei großen Modellen von Schienenfahrzeugwagenkästen geht die Elementanzahl leicht in die hunderttausende. Das aufbereitete Modell wird anschließend in ein Geometriaustauschformat (bspw. .step) exportiert, damit das CAD-Programm die Geometriedaten einlesen kann. Für die Berechnungsabteilung ergibt sich hier je nach Modellgröße und Netzqualitätsansprüchen ein Arbeitsaufwand von einer bis zu fünf Stunden.
2. Im nächsten Schritt übernimmt die Konstruktionsabteilung die Exportdatei und importiert sie in ein CAD-Programm. Je nach Modellgröße und Elementanzahl kann bereits dieser Import längere Zeit benötigen. Falls im Vorfeld keine händische Neuvernetzung oder Netzqualitätspflege durch die Berechnung erfolgte, ist an dieser Stelle zwingend das Prüfen des Netzes notwendig, um Performanceprobleme zu vermeiden. Diese Prüfung wird mit 0,5 bis zwei Stunden Arbeitsaufwand durch die Konstruktion geschätzt.
3. Anschließend folgt die Skeletterstellung selbst. Hierbei werden einzelne Punkte innerhalb der TO erstellt. Bei großen Modellen mit komplexen Topologien kann die Anzahl der Knoten dreistellig sein (vgl. Bild 7 in Kap. 5). Die Punkte werden anschließend mit Linien entsprechend den Verstreubungen der Topologie verbunden. Gegebenenfalls werden auch Flächen erstellt, falls die Topologie flächige Bereiche ausgebildet hat (Elementdichte ist nicht zu 0 oder 1 konvergiert) oder wo beispielsweise Fußböden, Wände oder andere Funktionselemente im Modell vorhanden sein sollen. Das Ergebnis ist nun das grundlegende Geometrieskelett. Als Zeitbedarf werden hierfür 8-14 Stunden geschätzt. Die längere Schätzung muss angesetzt werden, wenn das Skelett parametrisch aufgebaut sein soll.

Die Prozessanalyse zeigt, dass die Skelettableitung aus TOs mehrere Mitarbeiter aus verschiedenen Disziplinen involviert und sie für eine lange Zeit bindet. Automatisierung bietet hier das Potential, Arbeitnehmer zu entlasten und die Prozessqualität zu erhöhen.

3.3 Potential für Prozessautomatisierung

Durch die Automatisierung von Prozessschritten kann die Produktentwicklungszeit im Gesamten reduziert und/oder die Qualität des Produkts gesteigert werden. Automatisierte Prozesse sind oft schneller als die manuelle Ausführung und verbessern die Produktqualität durch eine höhere Präzision. Auch bei gleichem Zeitaufwand des automatisierten Prozesses ermöglicht die Freigabe von

Personalressourcen, dass Mitarbeiter anderen, kreativen Tätigkeiten nachgehen können und so das Produkt verbessern. Der automatisierte Prozess muss also nicht zwingend schneller sein als der Mensch, um wirtschaftlich attraktiv zu sein.

Der gesamte Skelettableitungsprozess, der im vorigen Kapitel vorgestellt wurde, bietet das Potential automatisiert zu werden. Die Skeletterstellung ist monotone Arbeit, die zwar Aufmerksamkeit, jedoch nur wenig Kreativität erfordert. Durch deterministische Algorithmen können gleichbleibende hochqualitative Ergebnisse erzeugt werden. Monotone und lang andauernde Tätigkeiten sind außerdem fehleranfällig und reduzieren die Mitarbeiterzufriedenheit. Durch den Wegfall der manuellen Hauptarbeit im CAD entfällt zudem die Vorarbeit der Berechnungsabteilung. Zusammenfassend bietet eine Prozessautomatisierung viele Vorteile:

- Reduzierung des manuellen Arbeitsaufwands, Freigabe von Personalressourcen
- Reduzierung monotoner und fehleranfälliger Arbeitsabläufe
- Erzeugung deterministischer Ergebnisse gleichbleibend hoher Qualität

4 Automatisierte Skelettableitung aus Topologieoptimierungen

Im Folgenden wird die automatisierte Skelettableitung aus TOs beschrieben. Die Prozesskette ist in Bild 5 dargestellt. Um die Skeletterstellung zu automatisieren, müssen mehrere Zwischenschritte eingeführt werden, die bei manueller Bearbeitung nicht nötig sind oder vom Anwender unbewusst durchgeführt werden, wie beispielsweise das Ausdünnen der Geometrie (Thinning). Die einzelnen Schritte werden im Folgenden beschrieben. Als einfaches Anschauungsbeispiel dient das Brückenmodell aus Bild 2.



Bild 5: Automatisierte Prozesskette der Skelettableitung aus Topologieoptimierungsergebnissen

4.1 Voxelisierung des Topologieoptimierungsergebnisses

Die Voxelisierung ist der zentrale Unterschied der Prozesskette gegenüber anderen Implementierungen. Ein Voxel ist ein Würfel auf einem Gitterpunkt in einem äquidistanten Gitter in einem dreidimensionalen Bild. Analog werden Quadrate auf Gitterpunkten eines zweidimensionalen Bilds als Pixel bezeichnet. Das Voxelgitter wird als dreidimensionaler Datenspeicher abgebildet, der Informationen als binäre Repräsentation enthält, ob an der Stelle des Voxels Material vorhanden ist (Wert 1) oder nicht (Wert 0). Er dient als Grundlage für alle nachfolgenden Prozessschritte.

Als Input für den Prozess dient das unbearbeitete Ergebnis einer TO (Bild 2 und Bild 4), das die Verteilung der Struktur im Raum vorgibt. Das Modell kann dabei aus 2D- und 3D-Elementen (Dreiecke, vierseitige Elemente oder Tetraeder) bestehen. Die Geometrieinformationen werden geladen und in ein Voxelmodell konvertiert (Bild 6, links). Durch optional zuschaltbare Symmetrieunterstützung um bis zu drei Ebenen lässt sich sowohl bei der Voxelisierung als auch in fast allen späteren Schritten Rechenzeit einsparen. Dies stellt eine Besonderheit im Vergleich zu ähnlichen Arbeiten dar.

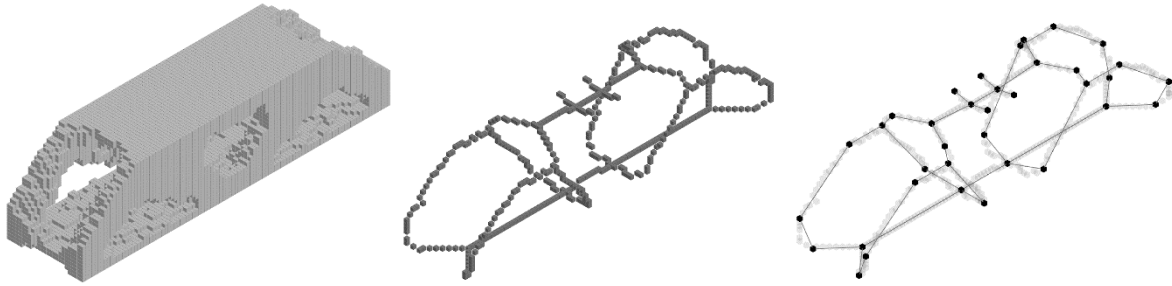


Bild 6: Voxelisierte TO des Brückenmodells (links), Voxelskelett (Mitte) und Drahtgitterskelett (rechts)

4.1.1 Voxelisierung der finiten Elemente

Zu Beginn muss die Voxelgittergröße vorgegeben werden. Sie sollte sich an der durchschnittlichen Elementgröße des FE-Netzes orientieren. Für das gesamte Volumen des FE-Modells wird anschließend ein dreidimensionaler Tensor erstellt, der das Voxelgitter repräsentiert. Es werden unterschiedliche Herangehensweisen für 2D- und 3D-Elemente verwendet. Die Voxelisierung für zweidimensionale Elemente basiert auf der Methode von Huang et al. (1998). Vierseitige 2D-Elemente werden zunächst in zwei Dreiecke geteilt. Für alle Dreieckselemente im Modell werden dann zuerst die Voxel aktiviert, die einen Eckpunkt eines finiten Elements umschließen. Danach werden die Elementkanten betrachtet. Ein Voxel wird dabei aktiv gesetzt, wenn der Abstand des Voxelzentrums zur Elementkante einen von der Voxelgittergröße abhängigen Abstandswert unterschreitet. Zuletzt werden die Elementflächen ähnlich wie die Elementkanten mit Hilfe eines Abstandswerts untersucht.

Bei dreidimensionalen Elementen wird zuerst das eingeschlossene Volumen der Tetraeder betrachtet. Die Flächenorientierung der vier begrenzenden Dreiecksflächen des Tetraeders wird so gewählt, dass die Normalenvektoren nach außen zeigen. Ein Voxel wird aktiviert, sofern der Abstand des Voxelzentrums zu allen vier begrenzenden Ebenen negativ ist, es also innerhalb des Elements liegt. Sollte ein Tetraederelement durch dieses Vorgehen keinen Voxel aktivieren, werden zusätzlich seine Elementkanten analysiert, wie im zweidimensionalen Fall. Durch dieses Vorgehen wird Rechenzeit eingespart.

4.1.2 Vorteile des Voxelansatzes

Viele andere Verfahren, die eine Geometrieableitung aus TOs zum Ziel haben, basieren auf dem FE-Netz selbst, etwa Nana et al. (2017). Sie verwenden direkt das FE-Netz des TO-Ergebnisses, müssen dieses jedoch zunächst glätten, um anschließende Prozessschritte ausführen zu können. Aufgrund der uneinheitlichen Größe der finiten Elemente und deren unregelmäßiger Form, ist die Glättung aufwendig.

Die Verwendung eines Voxelmodells bietet viele Vorteile gegenüber der direkten Verwendung des FE-Netzes. Zum einen können die Daten im Voxelmodell mit bewährten, sehr performanten und frei verfügbaren Bildverarbeitungsalgorithmen verarbeitet werden. Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung eines Voxelmodells kann Speicher- und Zugriffseffizienz sein. Ein FE-Netz besteht aus Knoten und Elementen. Jeder Knoten hat eine eindeutige Nummer und drei Raumkoordinaten. Elemente haben ebenfalls eine eindeutige Nummer und drei oder vier Knoten, die sie im Raum definieren. Verschiedene Elemente verweisen auf gleiche Knoten, wodurch sie miteinander fest verbunden sind. Für die Speicherung der Geometriedaten sind also mindestens zwei Datenstrukturen erforderlich und bei jedem Aufruf eines Elements müssen gleichzeitig die Knotennummern in der Datenstruktur der Knoten nachgeschlagen werden. Das Voxelmodell ist in einem dreidimensionalen Tensor gespeichert. Jeder Tensoreintrag ergibt direkt über seine drei Achsen die Lage des Voxels im Raum wieder. Durch die genaue und einfache Adressierbarkeit einzelner Voxel eröffnen sich viele Vorteile und Möglichkeiten, das TO-Voxelmodell zu analysieren und weiterzuverarbeiten.

Zuletzt ist die Abkoppelung des Modells vom FE-Netz selbst ein entscheidender Vorteil. Verschiedene FE-Solver verwenden unterschiedliche Formate für die Beschreibung des FE-Netzes. Durch die

Abstrahierung im Voxelmodell sind alle nachfolgenden Berechnungsschritte unabhängig vom für die TO verwendeten FE-Solver. Für die Unterstützung verschiedener Optimierungsalgorithmen und FE-Formate muss lediglich einmalig der Voxelisierungsschritt angepasst werden.

4.2 Erstellung des Voxelskeletts durch Thinning

Das Voxelmodell ist eine Repräsentation des FE-Netzes und enthält daher auch den Querschnitt der Stäbe. Diese geometrischen Informationen werden im Thinning entfernt und das Modell so auf ein Voxelskelett reduziert, bei dem die Skelettäste genau einen Voxel breit sind. Für die Skelettierung kommt der Thinning-Algorithmus nach Park und Lee (1997) zum Einsatz, da er selbst für große Datenmengen schnelle und valide topologische Skelette liefert. Zudem ist er in den open-source Bildverarbeitungsmodulen von scikit-image verfügbar (van der Walt et al. 2014). Nachteilig ist, dass der Algorithmus keine symmetrischen Skelette erzeugt, was jedoch durch Beschneiden, Spiegeln und Prüfdurchläufe speziell im Bereich der Symmetrieebenen des Voxelmodells korrigiert werden kann. Die Skelettierung im Sinne der Bildverarbeitung ist damit erfolgreich abgeschlossen und es liegt ein Voxelskelett vor (Bild 6, rechts).

4.3 Strukturknotenerkennung

Aus dem topologischen Skelett müssen Strukturknotenpunkte abgeleitet werden, also Bereiche erkannt, an denen mehrere Äste des Skeletts aufeinandertreffen. An diesen Stellen befinden sich Voxelcluster. Deren Detektion im Voxelskelett erfolgt mit Hilfe eines Algorithmus nach Klette (2006). Hierbei werden Nachbarschaftseigenschaften der Skelettvoxel untersucht, um Voxelcluster zu detektieren. Anschließend wird der jeweilige Schwerpunkt der Voxelcluster berechnet und die Voxel, die diesen am nächsten sind, als Strukturknotenpunkte ausgewählt. Auch dieser Prozessschritt unterstützt Symmetriebedingungen.

4.4 Herstellung von Knotenverbindungen und CAD-Import

Nachdem die Strukturknotenpunkte des Stabwerks im Voxelmodell identifiziert sind, wird mit Hilfe einer Flood-Filling-Methode herausgefunden, welche Knotenpunkte miteinander verbunden sind. Hierbei wird ein Knotenpunkt auf dem Voxelskelett ausgesucht und von ihm ausgehend nacheinander die Voxel der Äste abgesprochen, die von ihm wegführen. Wenn auf einem Ast ein anderer Knotenpunkt vorgefunden wird, wird dieser mit dem Startknotenpunkt über eine Linie verbunden. Dies wird für alle Strukturknotenpunkte durchgeführt bis jeder Ast des Voxelskeletts mindestens einmal abgesprochen wurde. Am Ende ist bekannt, welche Knotenvoxel es gibt und welche untereinander verbunden sind. Dadurch ergibt sich ein erstes Drahtgittermodell. Allerdings bilden die erstellten Linien lediglich die direkte Verbindung zwischen zwei Strukturknotenpunkten dar. Krümmungen der Äste im Voxelskelett wurden ignoriert. Daher erfolgt im Anschluss eine Linienglättung. Jeder Voxel des Voxelskeletts wird dazu abgesprochen und sein Abstand zur Linie des Drahtgittermodells ermittelt. Ist der Abstand über einem Schwellenwert, wird ein Zwischenknoten im Drahtgittermodell eingefügt. So wird sichergestellt, dass das Drahtgittermodell dem Voxelskelett ausreichend gut folgt. Das Ergebnis ist das fertige Drahtgittermodell (Bild 6, rechts). Es kann nun in das bevorzugte CAD-Format konvertiert und dort importiert werden. In CATIA kann dies zum Beispiel mit Hilfe der Visual Basic Schnittstelle erfolgen.

5 Anwendung am Beispiel eines Schienenfahrzeugwagenkastens

Der entwickelte automatisierte Prozess zielt spezifisch auf große Modelle ab, für die die händische Erstellung von Drahtgitterskeletten sehr aufwändig ist. Der Prozess wird beispielhaft auf das TO-Ergebnis eines Schienenfahrzeugwagenkastens angewendet (Bild 7, oben). Der Wagen ist symmetrisch

um die x-z- und die y-z-Ebene. Die Abmessungen des Wagens betragen 20 m x 3 m x 4,4 m. Das TO-Ergebnis enthält 2.825.400 FE-Knoten. Im Unterbodenbereich (grün) befinden sich 586.200 dreidimensionale Tetraederelemente. Die zweidimensional vernetzten Außenhüllen des Wagens (blau) bestehen aus 82.824 Dreieckselementen. Die durchschnittliche Elementgröße der Vernetzung beträgt 40 mm. Die Gittergröße des Voxelmodells beträgt 20 mm, wodurch das initiale Voxelgitter insgesamt etwa 33 Millionen Voxel enthält. In Bild 7 ist das automatisch erstellte Drahtgittermodell zu sehen. Das erstellte Drahtgittermodell enthält 2.107 Strukturknoten mit 3.653 Linienverbindungen dazwischen.

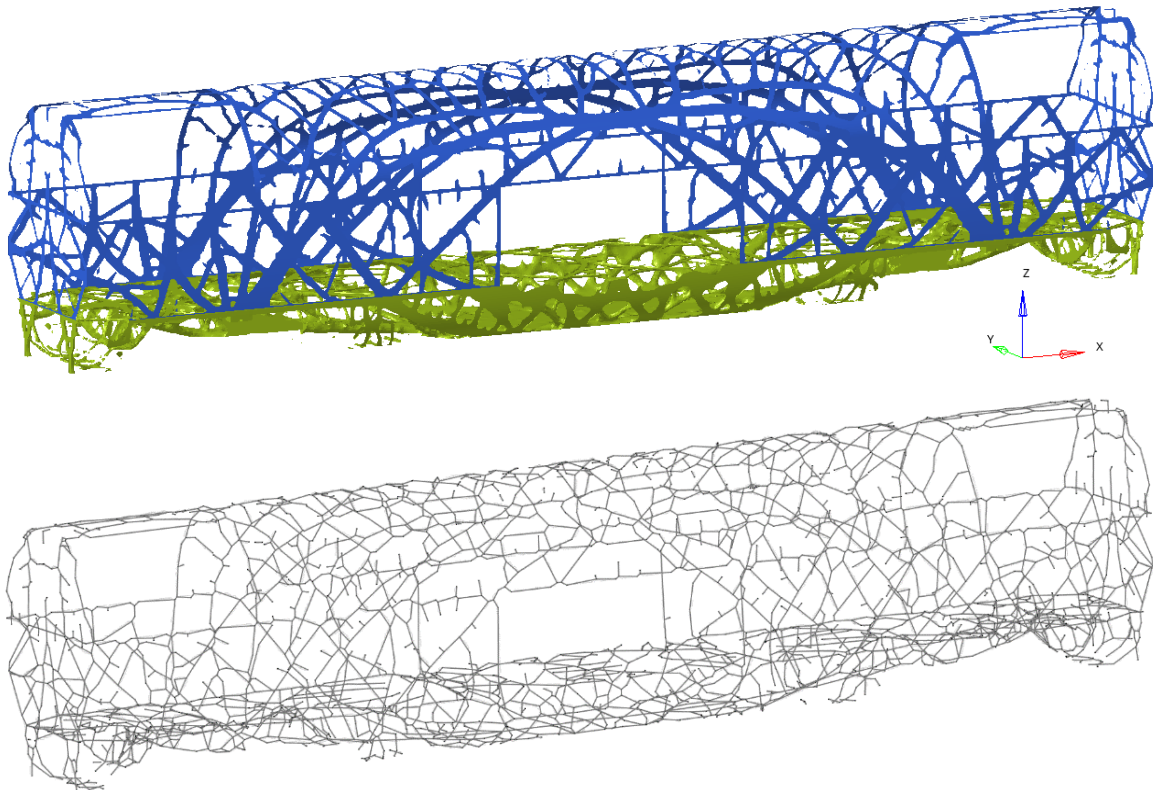


Bild 7: TO-Ergebnis (oben) und Drahtgitterskelett (unten) eines Schienenfahrzeugwagenkastens

Tabelle 2 enthält die Rechenzeiten bei Ausführung des Prozessprogramms auf einem Desktoprechner mit einem Intel Xeon E5-1660 Prozessor mit 3,2 GHz Basistaktrate. Das Programm läuft auf einem Kern. Die Laufzeiten bilden den Median aus fünf Durchläufen. Stellt man die Gesamtzeit von 3.810 s (ca. 1 h) in Relation zu den in Kapitel 3.2 vorgestellten Schätzungen der manuellen Arbeitszeit von mindestens neun Stunden, wird deutlich, wie viel Potential in der Prozessautomatisierung allein durch die Reduktion der Bearbeitungszeit realisiert werden kann. Hierbei ist zudem zu beachten, dass die Laufzeit des Programmcodes in Zukunft vermutlich weiter reduzieren werden kann.

Tabelle 2: Rechenzeiten des Wagenkastenmodells (Median aus fünf Durchläufen)

Prozessschritt	Zeit (s)
Einlesen des FE-Modells	25
Voxelisierung 2D-Elemente	265
Voxelisierung 3D-Elemente	2.973
Thinning zu Voxelskelett	7
Strukturknotenerkennung	343
Herstellung von Knotenverbindungen	197
Gesamtlaufzeit	3.810

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag stellt eine Methode vor, die den aufwändigen manuellen Prozess der Ableitung von Drahtgittermodellen aus Topologieoptimierungen automatisiert und beschleunigt. In Kontrast zu anderen Arbeiten auf diesem Gebiet wird ein Topologieoptimierungsergebnis zunächst in ein Voxelmodell umgewandelt, wodurch weitergehende Verarbeitungsschritte nicht mehr direkt vom ursprünglichen finite Elemente Netz abhängig sind, weniger Ressourcen beansprucht und effiziente Bildverarbeitungsalgorithmen für die Weiterverarbeitung eingesetzt werden können. Nach der Voxelisierung wird das topologische Modell mit einem Thinning-Algorithmus ausgedünnt. Es werden Strukturknoten erkannt und mit Linien verbunden. Das Skelett wird geglättet, um die Topologie genauer abzubilden. Am Ende steht ein Drahtgittermodell aus Punkten und Linien, das sich für parametrische top-down-Konstruktionen im CAD eignet.

Der Fokus der Arbeit liegt auf großen Strukturkomponenten wie Schienenfahrzeugwagenkästen oder Flugzeugtragflächen, bei denen die Weiterverwendung von Topologieoptimierungen viele Personalressourcen beanspruchen kann. Anwendungen sind jedoch für alle Arten und Größen von Topologieoptimierungen denkbar. Am Beispiel eines Schienenfahrzeugwagenkastens konnte gezeigt werden, dass sich die Bearbeitungszeit bei Betrachtung von Symmetriebedingungen mit dem automatisierten Prozess um den Faktor neun reduzieren lässt.

Das vorgestellte Verfahren stellt den ersten Schritt in einer größeren automatisierten Prozesskette dar, die die Interpretation und Weiterverarbeitung von Topologieoptimierungsergebnissen vereinfachen und beschleunigen soll. Potentielle Weiterentwicklungen beinhalten neben Performanceverbesserungen das Erkennen struktureller Besonderheiten wie zusammenhängende Flächen, das Analysieren von Querschnitten aus Optimierungen, das anschließende Erstellen und Neuberechnen von FE-Modellen auf Basis der extrahierten Skelette und Querschnitte, sowie letztlich den Aufbau eines parametrischen CAD-Modells, um frühe Konstruktionsprozesse im Produktentwicklungsprozess zu unterstützen.

Literatur

- | | |
|--------------------------|--|
| Altair Engineering Inc. | ALTAIR ENGINEERING INC.: <i>C123: Making Simulation a Collaborative Partner for Concept Development</i> . https://web.altair.com/c123 . Zugriff: 29.09.2020 |
| Billenstein et al. 2017 | BILLENSTEIN, Daniel; DINKEL, Christian; GLENK, Christian; RIEG, Frank: Bewertungswerkzeug zur effizienten Einbindung der Topologieoptimierung in den virtuellen Produktentwicklungsprozess. In: <i>Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2017</i> . Stuttgart : Fraunhofer Informationszentrum Raum und Bau, 2017, S. 117–126 |
| Cuillière et al. 2018 | CUILLIÈRE, Jean-Christophe; FRANÇOIS, Vincent; NANA, Alexandre: <i>Automatic construction of structural CAD models from 3D topology optimization</i> . In: <i>Computer-Aided Design and Applications</i> 15 (2018), Nr. 1, S. 107–121 |
| Feldhusen und Grote 2013 | FELDHUSEN, Jörg; GROTE, Karl-Heinrich: <i>Pahl/Beitz Konstruktionslehre</i> . Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013 |
| Frisch et al. 2016 | FRISCH, Michael; GLENK, Christian; DÖRNHÖFER, Andreas; RIEG, Frank: <i>Topologieoptimierung in kleinen und mittelständischen Unternehmen</i> . In: <i>ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb</i> 111 (2016), Nr. 5, S. 243–246 |
| Hsu und Hsu 2005 | HSU, Ming-Hsiu; HSU, Yeh-Liang: <i>Interpreting three-dimensional structural topology optimization results</i> . In: <i>Computers & Structures</i> 83 (2005), 4-5, S. 327–337 |

- Huang et al. 1998 HUANG, Jian; YAGEL, Roni; FILIPPOV, Vassily; KURZION, Yair: An accurate method for voxelizing polygon meshes. In: *IEEE Symposium on Volume Visualization (Cat. No.989EX300)* : IEEE, 1998, S. 119–126
- Ju et al. 2007 JU, Tao; BAKER, Matthew L.; CHIU, Wah: *Computing a family of skeletons of volumetric models for shape description*. In: *Computer aided design* 39 (2007), Nr. 5, S. 352–360
- Klette 2006 KLETTE, Gisela: Branch Voxels and Junctions in 3D Skeletons, Bd. 4040. In: *Combinatorial Image Analysis*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2006 (Lecture Notes in Computer Science), S. 34–44
- Koguchi und Kikuchi 2006 KOGUCHI, Atsushi; KIKUCHI, Noboru: *A surface reconstruction algorithm for topology optimization*. In: *Engineering with Computers* 22 (2006), Nr.1, S.1-10
- König et al. 2012 KÖNIG, Jens; KOPP, Gerhard; WINTER, Joachim; FRIEDRICH, Horst E.; SCHÖN, Martin: Methodology for force flow optimised car body structures and implementation, Volume 1. In: *Proceedings 12th Stuttgart International Symposium Automotive and Engine Technology : 13 and 14 March 2012, Stuttgart, Germany*. Wiesbaden : ATZlive, 2012
- Larsen und Jensen 2009 LARSEN, Shane; JENSEN, C. Greg: *Converting Topology Optimization Results into Parametric CAD Models*. In: *Computer-Aided Design and Applications* 6 (2009), Nr. 3, S. 407–418
- Lin und Chao 2000 LIN, C.-Y.; CHAO, L.-S.: *Automated image interpretation for integrated topology and shape optimization*. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 20 (2000), Nr. 2, S. 125–137
- Nana et al. 2017 NANA, Alexandre; CUILLIÈRE, Jean-Christophe; FRANCOIS, Vincent: *Automatic reconstruction of beam structures from 3D topology optimization results*. In: *Computers & Structures* 189 (2017), S. 62–82
- DIN EN 15273 Teil 3 2017 Norm DIN EN 15273 Teil 3 Oktober 2017. *Lichttraumprofile*
- Ostrosi et al. 2020 OSTROSI, Egon; BLUNTZER, Jean-Bernard; STJEPANDIĆ, Josip: A CAD Material Skeleton-Based Approach for Sustainable Design. In: *Transdisciplinary Engineering for Complex Socio-technical Systems – Real-life Applications* : IOS Press, 2020 (Advances in Transdisciplinary Engineering).
- Park und Lee 1997 PARK, Kyu in; LEE, Sang Uk: Geometric modeling from scattered 3-D range data, Bd. 2. In: *Proceedings of International Conference on Image Processing, 1997*, S. 712-715 vol.2
- Sander et al. 2013 SANDER, C.; PETRICH, D.; ALBERS, A.: *Extended Topology Optimization - two factors to decrease energy consumption of structural parts during dynamic movements*. In: Open Access am KIT. 2194-1629 (2013).
- Schumacher 2013 SCHUMACHER, Axel: *Optimierung mechanischer Strukturen : Grundlagen und industrielle Anwendungen. 2., aktualisierte und erw. Aufl.* Berlin : Springer Vieweg, 2013
- Tang und Chang 2001 TANG, Poh-Soong; CHANG, Kuang-Hua: *Integration of topology and shape optimization for design of structural components*. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 22 (2001), Nr. 1, S. 65–82
- Van der Walt et al. 2014 VAN DER WALT, Stéfan; SCHÖNBERGER, Johannes L.; NUNEZ-IGLESIAS, Juan; BOULOGNE, François; WARNER, Joshua D.; YAGER, Neil; GOUILLART, Emmanuelle; YU, Tony: *scikit-image: image processing in Python*. In: *PeerJ* 2 (2014), e453