

## Kurzfassung

---

Durch die stetige Digitalisierung immer weiterer Prozessschritte in der Produktentstehung können kontinuierlich Zeit und Kosten reduziert werden. Verfahren wie die Topologieoptimierung schaffen hierbei die Möglichkeit, unter Beachtung vielfältiger technischer Anforderungen eine gewichtsoptimierte Bauteilgestalt automatisiert zu generieren. Topologieoptimierungsergebnisse liegen jedoch meist in Form eines digitalen Modells vor, das nicht direkt innerhalb der rechnerbasierten Konstruktion (CAD) weiterverarbeitet werden kann. Dadurch ist eine manuelle und zeitintensive Nachkonstruktion nötig, bei der das Leichtbaupotential unter Umständen nicht voll ausgeschöpft wird. Das Ziel dieser Arbeit ist die automatisierte Überführung topologieoptimierter Strukturbauteile in einschränkungsfrei modifizierbare, häufig auch als „lebendig“ bezeichnete CAD-Modelle.

In einem zweistufigen Prozess wird zunächst die Topologieoptimierung durch eine Formoptimierung erweitert, um Bauteilwürfe mit glatten Oberflächen als geometrische Vorlage für CAD-Modelle zu erhalten. Analog zur Topologieoptimierung wird in einer sogenannten Eulerschen Darstellung die Bauteilgestalt durch eine räumlich diskretisierte Materialanordnung modelliert. Dadurch können sowohl als Eingang für die Formoptimierung direkt Topologieoptimierungsergebnisse als auch für deren Durchführung bestehende Datenstrukturen und Methoden verwendet werden. Die Modifikation der Bauteilgestalt erfolgt indirekt durch einen Materialtransport entlang eines Geschwindigkeitsfeldes, wodurch eine hohe Kontrolle über den Oberflächenverlauf und somit die Generierung glatter Bauteilwürfe ermöglicht wird.

Anschließend werden die topologie- und formoptimierten Strukturbauteile in einem zweiten Prozessschritt durch sogenannte Subdivision Surfaces nachgebildet. Diese zu gängigen CAD-Systemen kompatiblen Freiformflächen weisen eine hinreichende Flexibilität zur geometrisch und damit technisch exakten Nachbildung von Optimierungsergebnissen auf. Gleichzeitig muss eine praktikable Modifizierbarkeit innerhalb der weiteren Bauteilentwicklung sichergestellt werden. Ein Fokus dieser Arbeit liegt auf der Lösung

dieses Zielkonfliktes durch die Ausrichtung der Freiformflächen entlang der Bauteilkonturen, der Verwendung möglichst weniger Parameter in Form von Kontrollknoten sowie der Entwicklung eines Prozesses zum stabilen Verschneiden mit manuell vorkonstruierten CAD-Körpern.

Als Ergebnis wird eine automatisierte Generierung gewichtsoptimaler Bauteilentwürfe in Form von CAD-Modellen ermöglicht und die hierfür bislang notwendige Zeit um bis zu 80 % reduziert.

## Abstract

---

The ongoing digitization of further process steps in the product development enables a continuous reduction in time and costs. In this context, methods such as topology optimization enable the automated generation of lightweight component designs under consideration of a broad range of technical requirements. However, the resulting digital model of a topology optimization usually cannot be directly processed within computer-aided design (CAD) tools. This requires a manual and time-consuming redesign, which may not fully exploit the lightweight design potential. The aim of this work is the automated transfer of topology-optimized structural components into freely editable, often referred to as "living" CAD models.

In a two-step process, at first the topology optimization is extended by a shape optimization to obtain component designs with smooth surfaces as a geometric template for CAD models. Analogous to the topology optimization, the component shape is encoded by a spatially discretized material distribution in a so-called Eulerian representation. Thus, topology optimization results can be used directly as an input for the shape optimization and existing data structures and methods can be maintained. The modification of the component shape is performed indirectly by a material transportation along a velocity field, enabling a high control over the surface shape and thus the generation of smooth component designs.

Subsequently, the topology- and shape-optimized structural components are reconstructed in a second process step by using so-called subdivision surfaces. These free-form surfaces are compatible to common CAD systems and provide a sufficient flexibility for the geometrically and thus technically exact reproduction of optimization results. At the same time, a practicable modifiability within the further component development must be ensured. One of the main parts of this thesis addresses this contradiction by aligning the free-form surfaces along the component contours, using as few parameters as possible in terms of control points, and designing a process for a stable merging with pre-designed CAD bodies.

As a result, an automated generation of lightweight component designs as CAD models and a reduction of the previously required time by up to 80 % is made possible.

# 1 Einleitung

Virtuelle Methoden sind ideale Werkzeuge zur effizienten Entwicklung technischer Produkte. Der hiermit umsetzbare Übergang zur durchgängig digitalisierten und automatisierten Produktentstehung ermöglicht es Entwicklungszeiten zu verkürzen und somit neue Produkte in immer kürzeren Zyklen anbieten zu können. Der zunehmenden Dynamik von Angebot und Nachfrage kann dementsprechend mit einer früheren sowie preisgünstigeren Markteinführung innovativer Produkte begegnet werden. Für die Konkurrenzfähigkeit eines Unternehmens resultiert hieraus, dass nicht nur die Weiterentwicklung technischer Produkte, sondern ebenfalls die Weiterentwicklung virtueller Entwicklungsmethoden und -werkzeuge ausschlaggebend ist.

Bei Strukturbauteilen kann die virtuelle Entwicklung untergliedert werden in die Erstellung und Modifizierung der geometrischen Bauteilgestalt sowie der Simulation und Analyse der Bauteileigenschaften. Die geometrische Gestaltung erfolgt oft manuell innerhalb eines Programms zur rechnerbasierten Konstruktion (engl. *Computer Aided Design*, kurz: CAD). Verfahren zur virtuellen Erprobung ermöglichen die Simulation des Betriebsverhaltens oder auch des Herstellungsprozesses von Bauteilen. Auf Basis der Simulationsergebnisse wird die geometrische Bauteilgestalt anschließend solange angepasst, bis alle technischen Anforderungen erfüllt werden. Dieser iterative Prozess wird mit Hilfe von Verfahren wie der Strukturoptimierung zunehmend automatisiert.

Unter den Strukturoptimierungsverfahren bietet die Topologieoptimierung ein großes Potential zur weitgehenden Vermeidung einer manuellen Erstellung der geometrischen Bauteilgestalt. Auf Basis technischer Anforderungen hinsichtlich beispielsweise der Mechanik oder der Fertigbarkeit, wird eine möglichst optimale Materialverteilung im zur Verfügung stehenden Bauraum bestimmt. Das Ziel der Optimierung ist häufig die Minimierung des Bauteilgewichtes und somit oft auch der Kosten. Insbesondere im Fahr- oder Flugzeug reduziert der Leichtbau nicht nur den Materialeinsatz in der Fertigung, sondern ebenfalls den Energieverbrauch im Betrieb und damit einhergehend Emissionen und Umweltbelastungen.

Das Potential zur Verkürzung des Produktentwicklungsprozesses hängt wesentlich vom Umfang technischer Anforderungen ab, welche innerhalb der Topologieoptimierung beachtet werden. Werden einzelne Anforderungen nicht beachtet, so kann der resultierende Bauteilentwurf nicht direkt umgesetzt werden. Als Folge muss die geometrische Bauteilgestalt manuell überarbeitet werden, wodurch zeitaufwändige Schleifen zwischen Konstruktion und Simulation entstehen. Um derartige Verzögerungen des Entwicklungsprozesses zu vermeiden, werden Topologieoptimierungsverfahren stetig weiterentwickelt. Für mechanische Anforderungen bestehen beispielsweise Verfahren zur Beachtung der Festigkeit, der Steifigkeit, des Verformungsverhaltens oder der Eigenfrequenzen. Ebenso können weitere physikalische Eigenschaften beachtet werden, wie beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit oder die elektromagnetische Streuung. Parallel zum Bauteilverhalten im Betrieb, ist die Fertigbarkeit eine entscheidende Anforderung zur Umsetzbarkeit eines Bauteilentwurfes. Hierfür bestehen Weiterentwicklungen der Topologieoptimierung zur Sicherstellung einer Herstellbarkeit durch beispielsweise Gießen, Fräsen, Drehen oder Tiefziehen.

Zur Vermeidung einer manuellen Überarbeitung von Topologieoptimierungsergebnissen besteht eine weitere Herausforderung in deren Modellierung der Bauteilgestalt. Der gängigste Ansatz ist hierbei die sogenannte Eulersche Darstellung. Zunächst wird der zur Verfügung stehende Bauraum in kleine Teilbereiche diskretisiert. Die Bauteilgestalt wird anschließend

durch individuelle Indikatorwerte für jeden Teilbereich dargestellt. Als Indikator wird meist die Materialfüllung, bzw. die relative Dichte zwischen null und eins verwendet. Durch eine direkte Anpassung der Indikatorwerte können große geometrische Bauteiländerungen numerisch stabil durchgeführt werden. Allerdings ist in diesen dichtebasierten Topologieoptimierungsverfahren die Oberflächenkontur nicht explizit beschrieben, sondern implizit als Übergang zwischen Teilbereichen innerhalb und außerhalb der Bauteilgestalt enthalten. Bei der Optimierung muss nun sichergestellt werden, dass dieser Übergang möglichst schmal und damit eindeutig ist. Die gängigsten Ansätze sind hierbei die Bestrafung von Zwischendichten, welche weder innerhalb noch außerhalb des Bauteils liegen, sowie die Verwendung von binären Indikatorwerten, welche stets entweder null oder eins sind. Ein wesentlicher Nachteil dieser beiden Ansätze ist, dass die implizit enthaltene Oberflächenkontur meist einen unebenen Verlauf entlang des räumlichen Diskretisierungsgitters aufweist. Diese verfahrensbedingten Artefakte sollten unter anderem aus festigkeits- und fertigungstechnischen sowie ästhetischen Gründen nicht in die finale Bauteilgestalt übernommen werden und erfordern daher eine nachträgliche Überarbeitung.

Eine zweite Herausforderung stellt die Möglichkeit zur einschränkungsfreien Weiterverarbeitung von Topologieoptimierungsergebnissen innerhalb von CAD-Programmen dar. Zum einen werden mit Hilfe dieser Programme Fertigungsunterlagen und weitere Produktinformationen generiert, die für den weiteren Bauteilentstehungsprozess benötigt werden. Zum anderen werden hiermit manuelle Anpassungen an der geometrischen Bauteilgestalt durchgeführt. Beispielsweise werden Anbindungsbereiche zur Baugruppe überarbeitet oder geometrische Details für die Bauteilfertigung oder -lagerung hinzugefügt. Gängige CAD-Systeme basieren meist auf einer Modellierung der Bauteilgestalt in Form einer sogenannten Begrenzungsflächendarstellung, in der die Oberfläche durch eine glatte parametrische Funktion definiert ist. Topologieoptimierungsergebnisse in Form einer räumlich diskretisierten Dichtefunktion werden hingegen meist nicht unterstützt und können somit von gängigen CAD-Programmen nicht direkt weiterverarbeitet werden.

Daher ist für die weitere Produktentwicklung eine Überführung von Optimierungsergebnissen in ein entsprechendes CAD-Modell notwendig.

Die Erstellung eines CAD-Modells ausgehend von einem Topologieoptimierungsergebnis erfolgt aufgrund fehlender Verfahren zur hinreichenden Automatisierung meist manuell. Da die optimierte Bauteilgestalt oftmals sehr komplexe Oberflächenkonturen aufweist, stellt eine solche manuelle Nachkonstruktion einen zeitintensiven Prozess dar. Des Weiteren können geometrische Abweichungen des CAD-Modells zum Optimierungsergebnis eine Änderung technischer Eigenschaften bewirken. Daher müssen meist in einem iterativen und manuellen Prozess aus Konstruktion und Simulation die Bauteilgestalt und Eigenschaften des nachkonstruierten Modells weiter angepasst werden.

Vor diesem Hintergrund ist das Ziel der vorliegenden Arbeit die Verkürzung des Produktentwicklungsprozesses durch eine Reduzierung notwendiger manueller Prozessschritte zur Weiterverarbeitung von topologieoptimierten Bauteilmodellen. Als Eingang werden Optimierungsergebnisse in Form einer räumlich diskretisierten Dichtefunktion festgelegt, welche im industriellen Kontext am häufigsten Anwendung findet. Zum Erreichen der Zielsetzung werden zwei Teilaufgaben definiert. Zunächst soll der Prozess zur Bauteiloptimierung erweitert werden, um auf Basis der Dichtefunktion eine glatte und technisch optimale Oberflächenkontur zu erhalten. Als zweite Teilaufgabe soll die so definierte Bauteilgestalt in eine Darstellungsweise überführt werden, welche zu gängigen CAD-Programmen kompatibel ist. An dem hierbei generierten Konstruktionsmodell sollen gängige geometrische Anpassungen mit einer Präzision und Effizienz möglich sein, welche vergleichbar zu manuell erstellten CAD-Modellen sind. Ferner sollen die geometrische Gestalt und damit einhergehend die technischen Eigenschaften des automatisch erstellten Konstruktionsmodells über den gesamten Prozess möglichst konstant bleiben. Dadurch können manuelle Schleifen aus Konstruktion und Simulation vermieden, die Potentiale der virtuellen Bauteilentwicklung weiter ausgeschöpft und das Hervorbringen innovativer Produkte erleichtert werden.



Zur Behandlung dieser Aufgabenstellung wird zunächst ein Überblick über den virtuellen Entwicklungsprozess unter Einbeziehung einer Topologieoptimierung benötigt. Eine wesentliche Basis zum Verständnis der hierin verwendeten Verfahren stellt die digitale Beschreibung und Verarbeitung geometrischer Körper dar. Darauf aufbauend ist eine tiefergehende Auseinandersetzung mit aktuellen Verfahren zur Strukturoptimierung, zur geometrischen Konstruktion sowie zur Überführung von Optimierungsergebnissen in CAD-Modelle notwendig. Diese Themenfelder werden im dann folgenden Kapitel 2 zusammengefasst und der Beitrag dieser Arbeit zu bestehenden Ansätzen abgegrenzt. Die Umsetzung der Aufgabenstellung setzt eine Reihe an Grundlagen voraus, welche in Kapitel 3 aufgeführt werden. Zum einen wird die bei der Volkswagen AG entwickelte Strukturoptimierung LEOPARD erläutert, welche die verwendete Basis zur Erweiterung der Topologieoptimierung darstellt. Zum anderen werden Verfahren aus dem Bereich der Computergrafik aufgeführt, welche im Prozess zur Erstellung von CAD-Modellen Anwendung finden. In Kapitel 4 wird die erste Teilaufgabe dieser Arbeit behandelt. Hierbei werden zunächst analytische Ansätze zur Formoptimierung auf Basis einer Dichtefunktion erarbeitet und anschließend in einer numerischen Implementierung umgesetzt. Die zweite Teilaufgabe wird in Kapitel 5 behandelt. Auf Basis der dichte-basierten Formoptimierungsergebnisse wird ein Prozess vorgestellt, um die Bauteilgestalt automatisiert in eine Darstellungsweise zu überführen, welche zu gängigen CAD-Programmen kompatibel ist. Neben der Erstellung praktikabel modifizierbarer Freiformflächen wird ebenfalls der Verschnitt mit vorkonstruierten Funktionsflächen behandelt. Der Gesamtprozess aus dichte-basierter Formoptimierung und der Überführung in CAD-Modelle wird in Kapitel 6 anhand von Beispielen aus dem industriellen Kontext aufgezeigt und evaluiert. Abschließend erfolgt in Kapitel 7 eine Zusammenfassung und Diskussion sowie ein Ausblick dieser Arbeit.

## 2 Einordnung in den Stand der Technik

Seit dem Aufkommen industriell nutzbarer Computer wird der technische Produktentwicklungsprozess maßgeblich durch Verfahren zur virtuellen Simulation, Gestaltung und Fertigungsplanung geprägt [139]. Um 1950 wurden die ersten Fertigungsmaschinen mit numerischer Steuerung (engl.: *Numerical Control*, kurz NC) eingeführt, welche Steuerungsbefehle von Datenträgern einlesen und automatisch ausführen. In den späten 1960er-Jahren wurden die ersten Verfahren zur computergestützten Berechnung etabliert. Rechnergestützte Zeichenprogramme (engl. *Computer Aided Design*, kurz CAD) wurden Ende der 1970er-Jahre kommerzialisiert und haben stetig das analoge Zeichenbrett ersetzt. In den 1980er-Jahren wurde es zunehmend möglich, Bauteileigenschaften durch numerische Simulationen zu bestimmen und somit Erprobungen an realen Bauteilen zu ersetzen. Ebenso wurde die automatisierte Ableitung von Programmen zur rechnergestützten numerischen Steuerungen (engl.: *Computerized Numerical Control*, kurz CNC) von Fertigungsmaschinen möglich. In den 1990ern Jahren etablierten sich CAD-Systeme für eine dreidimensionale Konstruktion technischer Produkte, welche durch eine Verknüpfung mit der Simulation zunehmend automatisiert wird. Auch heute werden die Methoden zur Simulation, Gestaltung und Fertigung für Produkte aus den unterschiedlichen technischen Bereichen, wie der Produktions-, Energie- oder Informationstechnik, stetig weiterentwickelt. In dieser Arbeit werden insbesondere Verfahren zur Entwicklung lastübertragender Strukturbauteile untersucht.

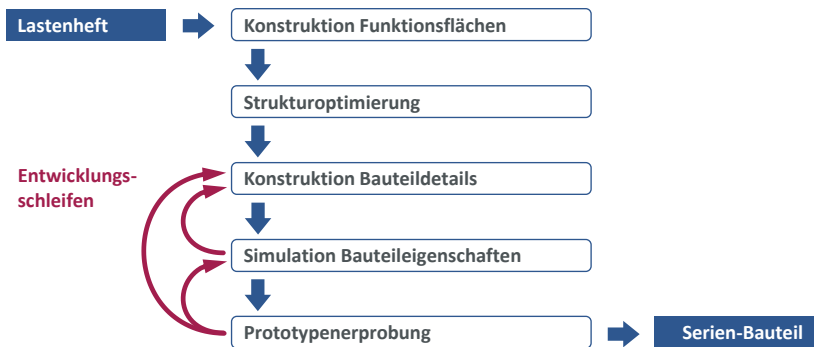
## 2.1 Entwicklungsprozess von Strukturbauteilen

Der Entstehungsprozess technischer Produkte wird unter anderen in Pahl/Beitz [96] und in der VDI 2221 [274] beschrieben. Dieser kann in die vier Phasen der Präzisierung der Aufgabenstellung, der Konzeptionierung von Funktionen und Lösungsprinzipien, des Entwurfs von Bauteilen und Baugruppen sowie der Ausarbeitung von Ausführungs- und Nutzungsangaben unterteilt werden. In dieser Arbeit wird im Speziellen der Entwurf, bzw. die Entwicklung lastübertragender Strukturbauteile bei bereits gegebenem Lastenheft betrachtet. Dieser Prozess ist schematisch in Abbildung 2.1 dargestellt. Die gegebenen Anforderungen an das Bauteil umfassen beispielsweise den zur Verfügung stehenden Bauraum, die wirkenden mechanischen Lasten, Temperatur- und/oder Witterungseinflüsse als auch Anforderungen wie beispielsweise einer minimalen Steifigkeit oder einer minimalen ersten Eigenfrequenz. Unter Beachtung dieser Anforderungen erfolgt vor der geometrischen Bauteilgestaltung oft eine initiale Auswahl des Bauteilmaterials und des Fertigungsverfahrens.

Zunächst werden innerhalb eines Konstruktionsprogramms die Funktionsflächen definiert, welche u. a. die Anbindungsbereiche des Bauteils innerhalb der Baugruppe sowie die Bauraumgrenzen umfassen können. Anschließend wird das Bauteil zwischen den Funktionsflächen ausgestaltet. Hierfür wird das erste Konzept häufig mit Hilfe einer Strukturoptimierung generiert. Als Eingang müssen neben dem Optimierungsziel und den Nebenbedingungen sowie den Funktionsflächen und Bauraumgrenzen ebenfalls die Kräfte und Momente gemäß dem Lastenheft definiert werden. Der Ausgang der Strukturoptimierung ist ein hinsichtlich des gewählten Zieles und unter Einhaltung der technischen Nebenbedingungen optimierter Bauteilentwurf. In der anschließenden Konstruktionsphase wird diese Bauteilgestalt ausdetailliert.

Beispielsweise werden hierbei Bauteilkennziffern eingepreßt, Positionsmarker hinzugefügt oder die geometrische Komplexität reduziert. Anschließend erfolgt eine Simulation der physikalischen Eigenschaften des Bauteils. Hierbei werden beispielsweise die mechanische Festigkeit oder auch

die Herstellbarkeit bestimmt. Kann eine unzureichende Festigkeit oder Herstellbarkeit festgestellt werden oder ist weiteres Potential zur Einsparung von Gewicht und Herstellungskosten ersichtlich, so erfolgt eine konstruktive Anpassung der Bauteilgestalt, welche wiederum erneut simuliert wird. Je nach Komplexität der technischen Anforderungen können in diesem Prozess bis zu einige hundert Bauteilkonzepte entstehen [139].



**Abbildung 2.1:** Entwicklungsprozess mechanisch belasteter Bauteile unter Verwendung einer Strukturoptimierung, angelehnt an [103].

Abschließend erfolgt die erste Fertigung eines Prototyps des Bauteils, mit dem die Ergebnisse aus der Simulation mit den realen Eigenschaften durch Versuche validiert werden. Wird hierbei festgestellt, dass das Bauteil die Anforderungen nicht erfüllt, so wird entsprechend die Bauteilgestalt konstruktiv angepasst und unter Umständen das Simulationsmodell überarbeitet, um eine genauere Vorhersage des realen Bauteilverhaltens zu ermöglichen.

Für die Konstruktion, Simulation und Optimierung ist die digitale Beschreibung der geometrischen Gestalt des Bauteils eine wesentliche Grundvoraussetzung. Allerdings werden in den jeweiligen Prozessschritten meist unterschiedliche Verfahren verwendet, welche sich für diese jeweils am besten eignen. Als Folge müssen vom gleichen Bauteil unterschiedliche