

RÜCKFÜHRUNG VON OPTIMIERTEN STRUKTUREN IN DEN ENTWICKLUNGSPROZESS

Andreas Burblies, Dr. Holger Fricke, Dr. Dirk Hennigs, Fraunhofer IFAM, Wiener Strasse 12, D-28359 Bremen
Dr. Claudia Bangert, FE-DESIGN GmbH, Haid-und-Neu Strasse 7, D-76131 Karlsruhe
Peter Hougardy, AUDI AG, D-85045 Ingolstadt

1. Einleitung

Durch den Einsatz moderner Optimierungsoftware lassen sich mittels der Topologieoptimierung innerhalb kurzer Zeit Designvorschläge für den beanspruchungsgerechten Leichtbau erzeugen [1][2]. Diese Verfahren, die auf der Finiten Elemente Analyse basieren, finden mehr und mehr Anwendungen in die Entwicklungsabteilungen und halten tiefgreifenden Einzug in den Entwicklungsprozess. Während die Finite Elemente Analyse bisher zu einem späten Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess durchgeführt wurde, werden die Verfahren zur Strukturoptimierung zu einem sehr frühen Zeitpunkt eingesetzt. Ausgehend von der Beanspruchungsverteilung in einem Bauraummodell ermittelt das Topologieoptimierungsprogramm Strukturbereiche, die nur geringe Beiträge zur Gesamtsteifigkeit des Modells leisten und entfernt diese Modellbereiche. Die so ermittelten Designentwürfe dienen dem Konstrukteur als Ideenlieferant für neue, innovative Konstruktionen.

Im Rahmen des BMBF Leitprojektes „Integrierte Virtuelle Produktentwicklung“ (iViP) [3] wurden im Rahmen des Projektclusters „Innovative Gestaltungswerkzeuge“ Technologien zur Strukturoptimierung in die Prozesskette integriert. Zur Visualisierung, Analyse und Verifikation der optimierten Konstruktionen benötigt man begleitende, flexible Konzepte, die eine schnelle Bereitstellung des Bauteils als CAD-Modell, FE-Netz und als Funktionsprototypen (RP = Rapid Prototyping) ermöglichen. Die Integration wurde von den Projektpartnern des Teilprojektes „Integrierte Topologie und Gestaltoptimierung im Konstruktionsprozess“ realisiert. In diesem Teilprojekt arbeiteten Anwender, Forschungsinstitute und Methodenentwickler unter der Leitung von der Firma FE-DESIGN GmbH in Karlsruhe eng zusammen. [4][5]

Ein Ziel der Arbeiten des Fraunhofer Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) in Bremen innerhalb des BMBF Leitprojektes war es, neue Werkzeuge zur integrierten Gestalt- und Topologieoptimierung sowie zur Kopplung von RP-Prozessen zu entwickeln, zu implementieren und zu erproben.

Als Softwareentwickler führte FE-DESIGN die Weiterentwicklungen an den Optimierungsmodulen durch. Aus den formulierten Anforderungen der Projektpartner ergaben sich viele funktionale Erweiterungen, die nach Projektende einem breiten externen Anwenderkreis zur Verfügung gestellt werden konnten.

Als einer der Anwender formulierte der iViP Projektpartner AUDI AG zu Beginn der Projektlaufzeit die Anforderungen an die Integration der Werkzeuge. Des weiteren wurden die entwickelten Prototypen ständig auf die praktische Einsatzfähigkeit hin geprüft.

Die Arbeiten entstanden im Rahmen der Unterstützung durch das BMBF vertreten durch den Projektträger für Produktion und Fertigungstechnologien (PFT) des Forschungszentrums Karlsruhe (Förderkennzeichen 02PL10xxx).

2. Glättung topologieoptimierter Strukturen

Das Verfahren der Topologieoptimierung basiert auf der Finiten Elemente Analyse. Ausgehend von einem maximal zur Verfügung stehenden Bauraum sowie den existierenden Randbedingungen ermittelt das System eine Materialverteilung, die einen gewichtsoptimalen Designentwurf repräsentiert. Basierend auf dem FE-Modell werden Elemente, die nicht im Kraftfluss liegen, aus dem Bauteil entfernt. Dies wird durch eine Variation der Dichte der einzelnen Finiten Elemente simuliert. Am Ende

des iterativen Optimierungsprozesses liegt ein Designentwurf vor, in dem die Elemente mit geringer Dichte ausgeblendet sind.

Dieser Designentwurf hat typischerweise sehr raue Oberflächen die durch die Flächen der Finiten Elemente repräsentiert werden. Für den Konstrukteur ist es insbesondere bei komplexen Strukturen nur schwer möglich, aus derartigen Modellen einen Konstruktionsvorschlag abzuleiten. Ziel muss daher sein, die Artefakte der Diskretisierung zu minimieren.

Innerhalb der iViP Projektcluster „Innovative Gestaltungswerkzeuge“ und „Werkzeuge zur virtuellen Fertigungserprobung“ hat das IFAM eine Software zur automatischen, adaptiven Glättung topologieoptimierter Strukturen entwickelt, die einerseits den Einsatz nachfolgender RP-Verfahren ermöglicht und andererseits die Integration der computergestützten Bauteiloptimierung in den Konstruktionsprozess durch eine verbesserte CAD- und FEM-Rückführung der Ergebnisse unterstützt. [6]

Mit der „ergebnisbasierten Glättung topologieoptimierter Strukturen“ entwickelte das IFAM ein mehrstufiges Verfahren, das kantige, stufenförmige Modelle prinzipiell vermeidet. Dieses Verfahren wurde in einem Software-Prototypen implementiert, der nach Abschluss des iViP-Projektes den Produktstatus erreicht hat und seit dem 3.Quartal 2002 unter dem Namen TOSCA.smooth durch FE-DESIGN vertrieben und in Kooperation mit dem IFAM stetig weiterentwickelt wird.

TOSCA ist ein modular aufgebautes Programm zur parameterfreien Strukturoptimierung von mechanisch beanspruchten Bauteilen und wird von der Firma FE-DESIGN entwickelt. Mit TOSCA lassen sich sowohl Topologie- als auch Gestaltoptimierungen von FE-Modellen mit beliebig vielen Last- und Randbedingungen durchführen. Die zur Grunde liegende FE-Strukturanalyse kann mit den Programmen ABAQUS,

ANSYS, I-DEAS und MSC.NASTRAN durchgeführt werden.

2.1. Das Modul TOSCA.smooth

Mit TOSCA.smooth steht ein kommerzielles Modul zur Aufbereitung von Optimierungsergebnissen innerhalb der Produktfamilie TOSCA zur Verfügung. Hierzu werden aus den Ergebnissen der Topologieoptimierung Oberflächen gleicher Dichte ermittelt. Nach einem Glättungsprozess werden die auf Grund der Elementierung sehr kleinen Flächen soweit wie möglich zusammengefasst und in CAD-kompatiblen Formaten sowie als Patranneutralfile ausgegeben. Ergebnisse einer Gestaltoptimierung lassen sich als datenreduziertes Oberflächenmodell in die gleichen Formate überführen. Da die Rechenzeiten für einen Lauf von TOSCA.smooth eher gering sind, kann zur besseren Interpretation der Ergebnisse jeder Optimierung der Aufruf von TOSCA.smooth angeschlossen werden.

Bei der Nachbearbeitung eines topologieoptimierten Modells mit TOSCA.smooth werden keine Elemente ausgeblendet (Abb. 1 a), sondern Teile der Elemente entlang der Fläche gleicher Dichte abgeschnitten, die durch einen Referenzwert bestimmt wird (Abb. 1 b). Durch die Angabe dieses Referenzwertes lässt sich das Zielvolumen des optimierten Bauteils nachträglich justieren, ohne die rechenzeitintensive Optimierung erneut starten zu müssen. Eine in der neuen Version 4.5.1 von TOSCA.smooth integrierte Volumenberechnung unterstützt dieses Vorgehen.

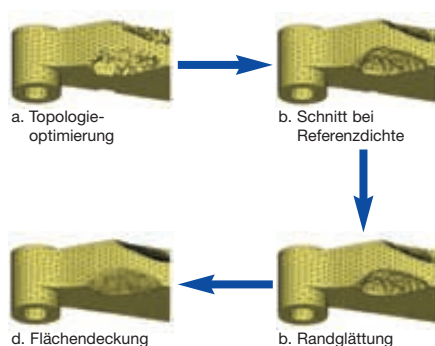


Abbildung 1: Schritte bei der ergebnisbasierten Glättung

TOSCA.smooth ermöglicht außerdem eine zweistufige Glättung der Bauteiloberfläche. Diese Glättung beschränkt sich automatisch auf die durch den Schnitt neu erzeugten Flächen. Vom Konstrukteur vorgegebene Bereiche werden dadurch nicht ver-

fälscht. Bei der Glättung wird die maximale Abweichung von der Referenzdichte als Qualitätskriterium berücksichtigt.

Im ersten Schritt der Glättung werden die Schnittkanten entlang der ursprünglichen Oberflächen so verschoben, dass ein glatter Schnittrand entsteht (Abb. 1 c). Die durch die Bauraumbegrenzung gegebenen Oberflächen werden dabei nicht abgerundet oder eingeschnürt. Im zweiten Schritt werden die Schnittflächen mit einem geometrischen Verfahren geglättet (Abb. 1 d). Eine aufwendige manuelle Elementselektion ist nicht nötig, da TOSCA.smooth direkt auf die Optimierungsergebnisse zurückgreift.

Glättung und Reduktion erzeugen prinzipiell geringe geometrische Abweichungen von der Ausgangsstruktur. TOSCA.smooth bietet deshalb die Möglichkeit den Grad der Glättung und der Reduktion über maximale Abweichung zu kontrollieren.

2.2. Datenschnittstellen

TOSCA.smooth nutzt das TOSCA-interne Optimierungsformat ONF. Zur Kompatibilität mit anderen Programmen können auch MSC.Patran-Neutralfile- und MSC.Construct-Result-Dateien gelesen werden. Für den Import von Modellen in CATIA eignet sich insbesondere die Ausgabe im STL Format. Für Pro/Engineer und Solid Works ist der Export des geglätteten Modells durch zwei verschiedene IGES Formate implementiert. Beim Export von Modellen für das Rapid-Prototyping im STL-Format, für das FEM-Postprocessing im Patran-Neutralfile Format und für die Anknüpfung an das Web im VRML Format ist keine Datenreduktion notwendig (Abb. 2).

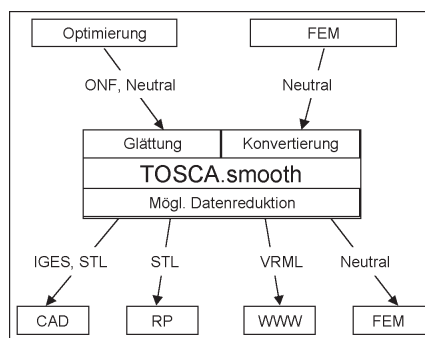


Abbildung 2: Schnittstellen von TOSCA.smooth

Die Exportfunktion von TOSCA.smooth kann natürlich auch zur Konvertierung eines nicht für die Optimierung erstellten

Finite Elemente Netzes vom Patran Neutralfileformat in eines der oben genannten Formate genutzt werden. Im Fall eines Volumenmodells wird die freie Oberfläche des Körpers berechnet und auf Wunsch eine Datenreduktion vorgenommen. In TOSCA.smooth wird am Ende der Glättung das Volumen des geglätteten Modells berechnet und dem Benutzer zur Kontrolle des aktuellen Entwurfs mit ausgegeben. Das nächste Release von TOSCA.smooth sieht eine Berücksichtigung der im Modell definierten Teilbereiche (Gruppen) vor.

TOSCA.smooth bietet für den Betrieb im Batch oder Kommandozeilen Modus einen umfangreichen Satz von Optionen zur Steuerung der Glättung und Ausgabe. Die Integration in die graphische Oberfläche von TOSCA ermöglicht eine komfortable Steuerung des Programms.

3. Rückführung in CAD-Systeme

Die Rückführung der Ergebnisse aus der Topologieoptimierung in CAD Systeme ist von zentraler Bedeutung, da die durch Optimierung ermittelten Designvorschläge dem Konstrukteur zur Verfügung gestellt werden müssen. Diese Entwürfe können dann vom Konstrukteur als Konstruktionsgrundlage verwendet werden.

TOSCA.smooth ermöglicht die Glättung topologieoptimierter Strukturen. Die Rückführungszeit von großen FE-Modellen in CAD-Systeme ist wegen der großen Flächenanzahl sehr rechen- und damit zeitintensiv. Dieses Problem verringert TOSCA.smooth durch eine Reduktion der Oberflächen des Modells. Datenreduktionsraten bis zu 70% lassen sich ohne signifikante Verschlechterung der Geometriequalität erreichen.

Anhand der Konzeptstudie eines Trapezlenkers bei der AUDI AG [3] zeigt sich deutlich die erzielbare Qualitätsverbesserung beim Glätten einer topologieoptimierten Struktur (Abb. 3). Besonders bei Verwendung von Tetraedern in der Optimierung erhält der Konstrukteur eine Vorlage als CAD-Modell, die wesentlich deutlicher die Optimierungsabsicht aufzeigt.

Durch die Datenreduktion (Abb. 4) lässt sich zudem die Einlesezeit im CAD-System verringern, im vorliegenden Beispiel von über 30 Minuten auf unter 4 Minuten.

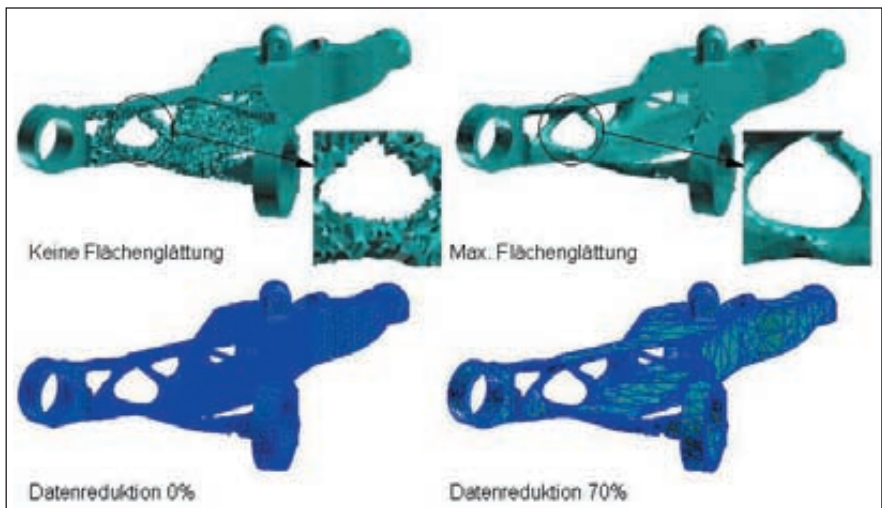


Abbildung 3: Flächenglättung am Beispiel eines Trapezlenkers

Durch die Reduktion hat sich die Oberflächenqualität nicht nennenswert verschlechtert.

Zudem ist die Modellgröße um den Faktor 3 geringer, was auch das Handling der Daten im CAD-System beschleunigt.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Vorteile durch den Einsatz von TOSCA.smooth:

- erheblich verbesserte Oberflächenqualität topologieoptimierter Strukturen
- wirkungsvolle Datenreduktion
- Informationsgewinn
- akzeptable Modellgrößen und Einlesezeiten auch bei großen Modellen im CAD-System
- Zahlreiche Weiterbearbeitungsmöglichkeiten im Konstruktionsprozess durch CAD-kompatible Exportschnittstellen:
- Messen von Abständen, Erzeugen von Schnitten usw. der importierten Geome-

trie (beispielsweise in Pro/E über IGES-Format)

- Erzeugung geschlossener Oberflächen in CATIA (über STL-Schnittstelle)
- Schnelle Erstellung von Prototypen über die STL-Schnittstelle

4. Beispiel Motorträger

Die Integration der Software in die Prozesskette der virtuellen Produktentstehung kann anhand der Entwicklung eines Motorträgers veranschaulicht werden, dessen Bauraum und Lastfall dem IFAM freundlicherweise von der Volkswagen AG für Demonstrationszwecke zur Verfügung gestellt wurden. Die Berechnung, Optimierung, Nachkonstruktion und das Rapid Prototyping des Bauteils wurden am IFAM durchgeführt.

Für die Definition des im Motorraum zur Verfügung stehenden Bauraums wurde das



a. Zur Verfügung stehender Bauraum



b. Topologieoptimierter Motorträger



c. Glättung und Datenreduktion mit TOSCA.smooth



d. Nachkonstruktion auf Basis der Topologieoptimierung

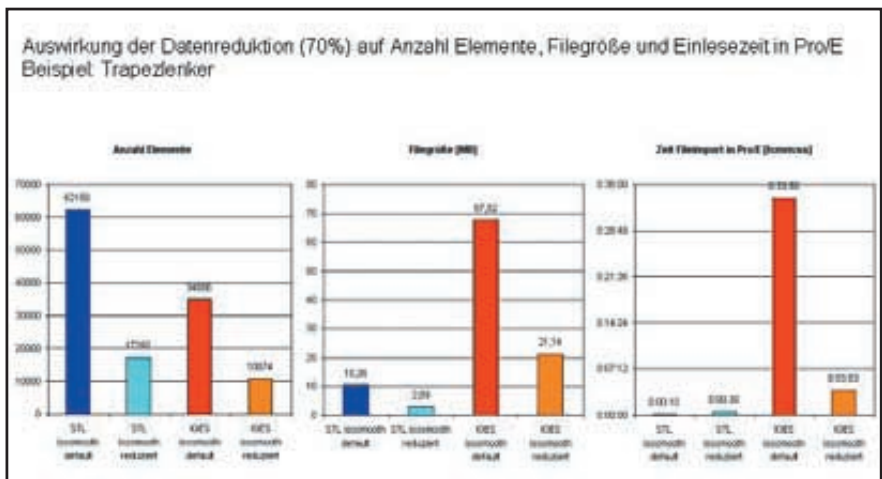


Abbildung 4: Geometrieimport der geglätteten Ergebnisse in ein CAD-System

Abbildung 5: Topologieoptimierung eines Motorträgers der Volkswagen AG

CAD-System Pro/Engineer eingesetzt (Abb. 5 a). Nach der Erzeugung des Finite Elemente Netzes und dem Aufbringen der Lasten durch den Berechnungsingenieur mit MSC.Patran wurde das Optimierungssystem TOSCA in Kombination mit dem Finite Elemente Programm ABAQUS für die Topologieoptimierung genutzt (Abb. 5 b). Nach der Glättung mit TOSCA.smooth wurde das Modell als STL Datei exportiert und anhand dieser Daten mittels RP-Technologien als physischer Prototyp hergestellt (Abb. 8 c). Mit einer Datenreduktion um 70% (Abb. 5 c) durch TOSCA.smooth wurde das Modell ebenfalls als IGES Datei exportiert und stand nach dem Import in Pro/Engineer dem Konstrukteur in seiner gewohnten Arbeitsumgebung zur Verfügung. Hierbei kann der Konstrukteur durch den physischen Prototypen eine besseres Verständnis für den Konstruktionsvorschlag der Topologieoptimierung entwickeln. Für die fertigungsgerechte Umsetzung (Abb. 5 d) des Konstruktionsvorschlags wurde das vorhandene CAD-Modell des Bauraums genutzt.

5. Erzeugen physischer Prototypen

Die Entscheidung über den serienmäßigen Einsatz des Bauteils kann letztendlich nur mit Hilfe realer physischer Bauteile getroffen werden, die z.B. für Einbauversuche oder mechanische Tests herangezogen werden können. Ergebnisse dieser Tests und Versuche können dann direkt in den virtuellen Produktentwicklungsprozess zurückf-

ließen. Der Anforderung das derartige Prototypen innerhalb kürzester Zeit in seriennaher Qualität oder in Serienqualität zur Verfügung stehen müssen, werden in idealer Weise durch Rapid-Prototyping Verfahren erfüllt. Der Einsatz dieser Verfahren hat sich in den letzten Jahren derart rasant verbreitet, dass sie sich zu einem etablierten, Kosten und Zeit sparenden Element in der Prozesskette der Produktentwicklung entwickelt haben.

Der große Vorteil der Verfahren ist, dass die Werkstücke direkt über einen generativen Formgebungsprozess ohne die Verwendung von spanabhebenden Werkzeugen vollautomatisch hergestellt werden. Die Bandbreite einsetzbarer Werkstoffe ist inzwischen um eine Vielzahl metallischer Werkstoffe ergänzt worden, so dass die oben beschriebenen Anforderungen an die zu realisierenden Prototypen ideal erfüllt werden können. [7][8]

Rapid-Prototyping Verfahren sind additive Verfahren, die im Gegensatz zu konventionellen Fertigungsverfahren (z.B. Drehen, Fräsen, Bohren, etc.) die gewünschte Geometrie nicht durch Materialabtrag, sondern durch Materialauftrag erzeugen. Basis aller verfügbaren Rapid Prototyping Prozessketten ist der STL-Datensatz des gewünschten Bauteils. Dieser wird mit Hilfe einer speziellen Software (z.B. VISCAM, MAGIC3) in eine Vielzahl eng beieinander liegender Schichten zerlegt (Slicen). In Abb. 6 ist das STL-Datenmodell und die dazugehörige Schichtdarstellung des hier

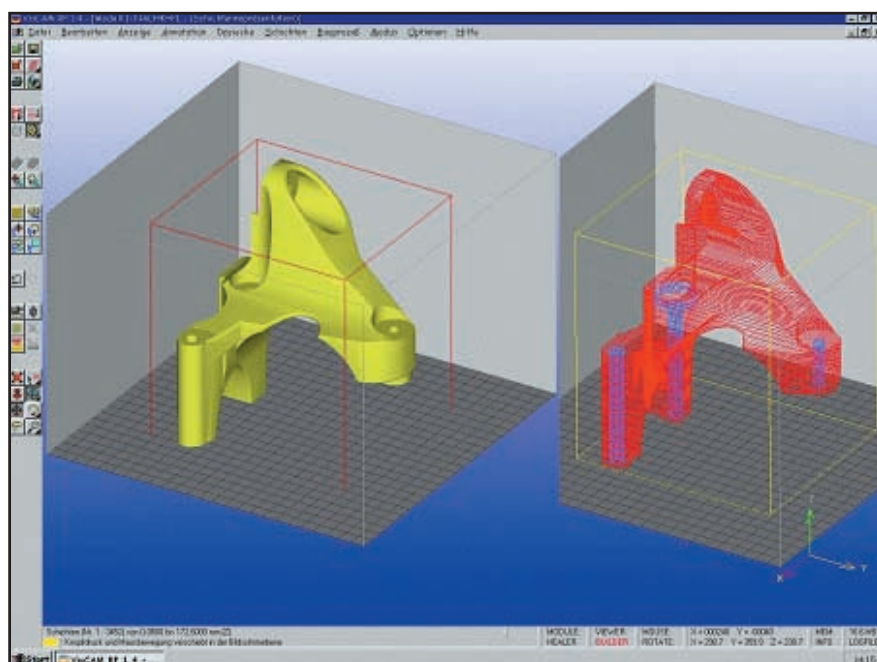
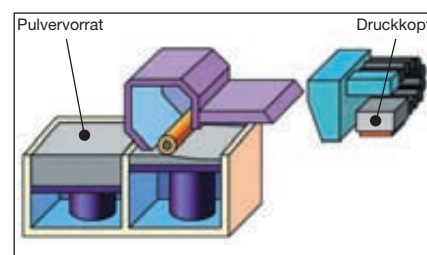
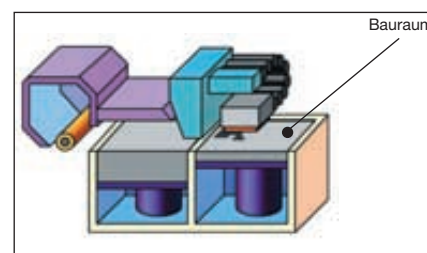


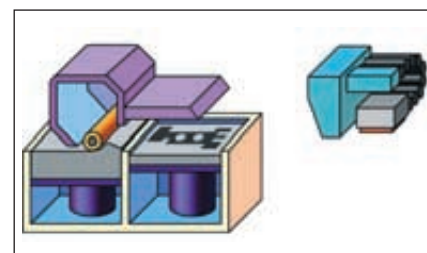
Abbildung 6: STL Datenmodell und Schichtdarstellung des Motorträgers



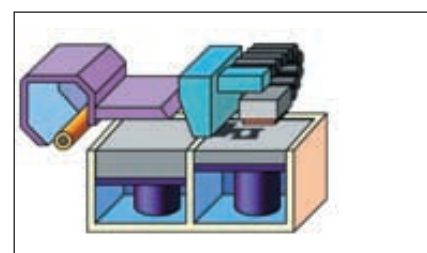
a. Eine neue Lage Pulverschicht wird aufgetragen



b. Der nächste Layer des Bauteils wird gedruckt



c. Der gedruckte Layer wird getrocknet



d. Neues Pulver wird aufgebracht und der Prozess wiederholt

Abbildung 7: Prozessablauf 3D-Printing nach ProMetal

behandelten Motorträgers dargestellt. Die typische Dicke einer Schicht ist abhängig von der eingesetzten Rapid Prototyping Maschine und liegt zwischen 20µm und 170µm. Die so erzeugten geometrischen Schichtinformationen dienen direkt zur Steuerung der Rapid-Prototyping Anlagen, in denen die durch das Slicen erzeugten Konturen schichtweise in z-Richtung aufgebaut werden, bis letztendlich das gesamte Bauteil hergestellt ist. Die Materialaus-

härtung erfolgt hierbei je nach verwendeten Rapid Prototyping Anlage durch z.B. eine lokale Versinterung (direktes Metall-Lasersintern), durch eine lokale Photopolymerisation eines Epoxidharzes (Stereolithographie) oder durch Verwenden eines Metallpulverwerkstoffs und eines Bindersystems (3D-Printing).

Dieses auf einem MIT-Patent beruhende 3DP-Verfahren ist ein am IFAM und erstma-

lig in Europa eingesetztes neues Rapid-Prototyping-Verfahren. Betrachtet man die oben beschriebenen Anforderungen, bietet es besonders gute Voraussetzungen zur Herstellung metallischer Werkstücke. Für die Herstellung des hier behandelten Motorträgers wurde das Verfahren 3-Dimensional Printing von ProMetal verwendet. Der prinzipielle Ablauf des Bauprozesses ist in der Abb. 7 schematisch dargestellt.

Werkstoffeigenschaften	Edelstahl 316+Bronze	Edelstahl 420+Bronze	
physikalisch	Dichte	8,10 g/cm ³	8,07 g/cm ₃
mechanisch	Härte	60 HRB	26 – 30 HRC
Dehnung	Zugfestigkeit	407 N/mm ²	682 N/mm ²
	Streckgrenze	234 N/mm ²	455 N/mm ²
	Elastizitätsmodul	148 kN/mm ²	147 kN/mm ²
		8,0 %	2,3 %
thermisch	Leitfähigkeit	80 W/mK	85 W/mK
	Wärmeausdehnungskoeffizient	8,3 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹	7,2 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹
	Spezifische Wärme	0,4 kJ/kgK	0,46 kJ/kgK

Tabelle 1: Werkstoffe und deren Eigenschaften im 3D printing Prozess



Abbildung 8: Prototypen des Motorträgers hergestellt nach 3D-Printing Verfahren (a. Bauraum, b. optimiertes Modell, c. geglättetes Modell, d. Nachkonstruktion)



Abbildung 9: Physischer Funktionsprototyp des nachkonstruierten Motorträgers

Zunächst wird eine dünne Lage Pulver auf der Bauplattform aufgebracht. Ähnlich dem Tintenstrahldruckerprinzip wird dann durch einen Druckkopf (8 Düsen a 45µm Durchmesser) ein Binder auf die Pulverpartikel (Partikelgröße ca. 60-80µm) gedruckt, die später das Bauteil formen sollen. Anschließend wird die Bauteilplattform um eine Schichtdicke abgesenkt und eine neue Lage Pulver aufgebracht. Der Prozess wiederholt sich so lange, bis das Bauteil vollständig gedruckt worden ist. Nach dem Bauprozess besteht das sogenannte "Grünteil" zu ca. 60 Vol% aus Metallpulver und zu ca. 10 Vol% aus dem organischen Binder. Die mechanische Belastbarkeit dieses "Grünteils" ist äußerst gering. Durch einen anschließenden Sinterprozess wird das Bauteil in einen Zustand hoher Festigkeit überführt. In diesem zeit- und temperaturgesteuerten Prozess wird in einem ersten Schritt die organische Binderkomponente entfernt und bei höheren Temperaturen die eigentliche Versinterung durchgeführt. Nach der Sinterung besitzt das Bauteil ca. 60% der theoretischen Dichte des Werkstoffes.

Durch einen abschließenden Infiltrationsprozess mit einer Bronzelegierung, der bei Temperaturen um ca. 1.100°C durchgeführt wird, können die bestehenden Poren geschlossen werden. Das Bauteil weist nach der Infiltration eine Dichte von 100% auf. Bei dem im Prozess verwendeten Edelstahl/Bronze-Gemisch beträgt der durch die Sinterung und Infiltration hervorgerufene Bauteilswund ca. 1,5%.

In Tab. 1 sind die wesentlichen Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe dargestellt. Abb. 8 und Abb. 9 zeigen die gedruckten und infiltrierten Bauteile des Motorträgers.

6. Literaturliste

- [1] Burblies, A.
Simulation in der Produkt- und Prozessentwicklung:
Computergestützte Bauteilanalyse;
Konstruktion 4 (2001) 34-36
- [2] Burblies, A.
Leichtbau - schnell und einfach:
Softwarelösungen für Strukturen von tragenden Teilen;
Konstruktion 5 (2002) IW3
- [3] F.-L. Krause, T. Tang, U. Ahle (Hrsg.)
Integrierte virtuelle
Produktentstehung, Abschlussbericht
Juli 2002
- [4] Fricke, H./Himmler, G./Hougardy, P./Lauber, B./Meske, R./Müller, O./Neithardt, W./Sauter, J.
Integrierte Topologie- und Gestaltoptimierung in der virtuellen Produktentwicklung – Konzeption und industrielle Anwendung
Veröffentlichung in VDI Konstruktion 3 (2001)/Springer VDI Verlag/S. 56-60
- [5] Sauter, J./Fricke, H./Güngör, Z./Himmler, G./Hougardy, P./Lauber, B./Müller, O./Neithardt, W./Schirmacher, R.
Integrierte Topologie- und Gestaltoptimierung im virtuellen Produktentstehungsprozess – Einbindung in die iViP Architektur und industrielle Anwendung
Internationaler VDI-Kongress/14.-15. September 2000/Würzburg
- [6] Spath, D/ Neithardt, W/ Bangert, C
Integration of Topology and Shape Optimization in the Design Process
2001 International CIRP Design Seminar 6.-8. Juni 2001, Stockholm Schweden
- [7] Hennigs, D.
Rapid-Prototyping – Neue Ansätze und Verfahren insbesondere für die Herstellung von Werkzeugeinsätzen mit Hilfe generativer Fertigungsverfahren in: Von der Produktgestaltung bis zur Fertigungsplanung, Berichte aus Praxis und Forschung
Hrsg. Goch, G., Hirsch, B.E., Scholze-Reiter, B., Thoben, K.D.
Verlag Mainz, ISBN 3-89653-966-3, 2002
- [8] Hennigs, D./ Pohl, H.
Die Herstellung metallischer Bauteile bzw. Werkzeugeinsätze mit Hilfe des Rapid Prototyping Verfahren ProMetal 3D-Printing
7. Fachtagung Rapid Prototyping Fachhochschule Lippe/Lemgo, 15.November 2002

