

# Konstruktive Umsetzung der mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode optimierten Designvarianten in fertigungsgerechte Bauteile

## Technische Mechanik, FEM, Leichtbau

### Projektleiter

Prof. Dr.-Ing.  
Wilfried Fischer

### Zeitraum

2001–2005

### Mitarbeiter

stud. Hilfskräfte  
Dipl.-Ing. (FH) D. Bense,  
cand.-Ing. (FH)  
H. Blumenthal,  
Dipl.-Ing. (FH)  
St. Kleinewegen,  
Dipl.-Ing. (FH) M. Pauli,  
Dipl.-Ing. (FH) P. Weinert

### Kontakt

Prof. Dr.-Ing.  
Wilfried Fischer,  
Fachbereich  
Maschinenbau,  
Fachhochschule  
Dortmund,  
Sonnenstr. 96,  
44139 Dortmund,  
Telefon:  
(0231) 9112-157,  
Fax: (0231) 9112-334,  
E-Mail: wilfried.fischer@  
fh-dortmund.de,  
Homepage: serv01.  
maschinenbau.  
fh-dortmund.de/  
~fischer/Fischer.htm

### Abstract

Bei der Berechnung von Konstruktionen wird immer häufiger auf die Finite-Elemente-Methode und die rechnergestützte Optimierung zurückgegriffen. Untersucht man die Optimierungsarten allerdings näher, so lässt sich feststellen, dass es bei praxisrelevanter Anwendung noch zahlreiche offene Fragen gibt. Zu nennen ist besonders die Rückführung optimierter FEM-Modelle in fertigungsgerechte Konstruktionen. Durch das an der FH Dortmund neu entwickelte Optimierungssystem **“OPIUM”** und durch die Entwicklung von Zusatzmodulen zu vorhandenen Optimierungssystemen wird aber erst der unbedingt notwendige Schritt vom theoretisch optimalen Designvorschlag zur praktisch optimalen fertigungsgerechten Konstruktion ermöglicht. Ziel ist es, die FEM-gestützte Strukturoptimierung so weiter zu entwickeln, dass sie problemlos auf reale Bauteile angewendet werden kann. Im Rahmen dieses Projektes wurde **“OPIUM”** auf der CeBIT in Hannover der Fachwelt präsentiert – **“OPIUM”**, mit dem Bauteile effizient und einfach analysiert und optimiert werden können, wird seitdem an der FH Dortmund ständig weiter entwickelt.

### Forschungsgegenstand

Der Leichtbau von Konstruktionen und damit die genaue Ausdimensionierung einzelner Komponenten setzt sich - besonders in der Fahrzeugtechnik - immer stärker durch. Auf der einen Seite sollen Fahrzeuge aufgrund der damit zusammenhängenden Energieeinsparungen immer leichter werden; auf der anderen Seite werden aber immer höhere Sicherheitsanforderungen und Komfortansprüche an diese Fahrzeuge gestellt. Um diese gegensätzlichen Ziele erreichen zu können, wird bei Festigkeits-, Schwingungs-, Beul- und Crashanalysen immer häufiger auf die Finite-Elemente-Methode (FEM) und die rechnergestützte Optimierung zurückgegriffen. Zur Zeit sind schon einige FEM-Systeme kommerziell verfügbar, die Module zur Optimierung von Bauteilen bezüglich ihres Gewichtes oder ihres Schwingungsverhaltens anbieten. Dies gilt für die Parameteroptimierung, für die Formoptimierung und für die Topologieoptimierung. Untersucht man dies allerdings näher, so lässt sich feststellen, dass es bei allen Optimierungsarten noch zahlreiche offene Fragen gibt. Zu nennen sind hier beispielsweise das Knick- und Beulverhalten, die diskrete Optimierung und die Rückführung optimierter FEM-Modelle in fertigungsgerechte Konstruktionen.

### Aktueller Stand der wissenschaftlichen Diskussion

Um die Prozesskette vom optimierten Vorentwurf zum fertigungsgerechten Bauteil realisieren zu

können, muss diese mehr oder weniger automatisiert werden. Zur Zeit werden die Schnittstellen zwischen CAD- und FEM-Systemen immer weiter verbessert - trotzdem gibt es üblicherweise in der Praxis häufig große Probleme bei der Übertragung der Bauteildaten von einem System in ein anderes System. Selbst bei genormten Schnittstellen (VDAFS, IGES, STEP) kann es immer noch zu Datenverlusten kommen. Dies liegt natürlich auch in den strukturellen Unterschieden von CAD- und FEM-Modellen. Sind diese Probleme allerdings gelöst, müssen weitergehende Schritte unternommen werden, um die automatisierte Bauteiloptimierung zu verwirklichen. Hierzu gehört einerseits die Entwicklung effektiver mathematischer Glättungsalgorithmen, die die Oberflächen der Designvorschläge, die durch die Topologieoptimierung entstehen, fertigungsgerecht gestalten. Andererseits müssen weitergehende Fertigungsrestriktionen in die Optimierungsstrategien implementiert werden. Zu nennen ist hier die Notwendigkeit, Mindestwandstärken von Stegen und Rippen, definierte Ausziehrichtungen u. ä. bei der Topologieoptimierung zu gewährleisten, um gussgerechte Konstruktionen zu erhalten. Darüber hinaus müssen wirtschaftliche Gesichtspunkte erfassbar werden, um die gewichtsoptimalen Bauteile auch kostenoptimal zu gestalten.

### Angewandte Forschungsmethoden

Durch Parameteroptimierungen einfacher und komplexer Fachwerk-, Rahmen- und Schalenbauteile zeigt sich, dass die Querschnittsoptimierung von Stabtragwerken und die Wandstärkenoptimierung von Flächentragwerken relativ unproblematisch ist. Schwierigkeiten treten lediglich durch die teilweise sehr hohe Anzahl an Designvariablen und an Iterationsschritten auf. Auch für die Berücksichtigung des Knick- bzw. Beulverhaltens muss noch nach Verfahren gesucht werden, mit denen man diese Probleme sinnvoll optimieren kann. Das Optimierungssystem **“OPIUM”** der FH Dortmund bietet hier bereits erste Ansätze, diese können aber noch verbessert und erweitert werden. Anders verhält es sich bei der Gewichtsoptimierung von Rahmentragwerken, bei der es durch das Fehlen eines direkten Zusammenhangs zwischen dem Volumen und den Flächenträgheitsmomenten zu keiner allgemeinen Parameteroptimierung kommen kann. Aus diesem Grund ist z. B. in **“IDEAS”** eine Standardprofilbibliothek integriert, mit der dann auch die Optimierung von Rahmentragwerken problemlos durchgeführt werden kann. Die Erkenntnisse sind durch einen Vortrag

auf der MSC-Technologie-Konferenz und durch zwei Diplomarbeiten veröffentlicht.

Topologieoptimierungen von akademische Schalen- und Volumenbauteilen und auch praxisrelevanten Bauteilen führen häufig zu wesentlich leichteren Neukonstruktionen, so dass der Einsatz der rechnerunterstützten Optimierung hierbei sehr lohnenswert ist. Stellt man die Resultate mehrerer Softwarepakete zur Topologieoptimierung (**“OptiStruct”, “Construct”, “OPIUM”**) gegenüber, so zeigt sich, dass die Optimierungserfolge sehr stark von der Art der Anwendung dieser Systeme abhängen und das umfangreiche Erfahrungen notwendig sind, um zufriedenstellende Resultate zu erhalten. Als Ergebnis wurden im Rahmen einer Diplomarbeit und eines Vortrages im Industriearbeitskreis Strukturoptimierung Hinweise gegeben, wann welche Software Vor- bzw. Nachteile bietet und wie die Systeme einzusetzen sind.

#### Forschungsergebnisse

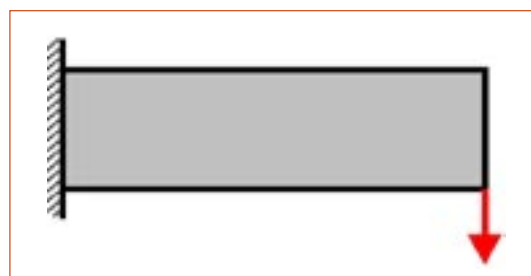
Bei der Umsetzung der Designvarianten aus Topologieoptimierungen in fertigungsgerechte Konstruktionen wird zunächst an zweidimensionalen Schalenbauteilen untersucht, in welchen Fällen sich hieraus Fachwerk-, Rahmen- oder Schalenstrukturen ableiten lassen. Hierbei muss selbstverständlich analysiert werden, inwieweit einzelne Parameter bei der Durchführung der Topologieoptimierung den Vorentwurf beeinflussen. Anschließend müssen für einzelne Designvarianten konkrete Konstruktionsvorschläge erarbeitet werden. Es wird dabei versucht, allgemeingültige Wege zu finden, die bei ähnlichen Komponenten möglichst schnell zum Ziel führen. Durch abschließende FEM-Berechnungen muss verifiziert werden, welche der Bauteilstrukturen zu fertigungsgerechten Konstruktionen führen.

Zunächst wird ein einseitig eingespannter Kragträger mit einer Einzellast optimiert, Bild 1a. Der Querschnitt des Ausgangsmodells ist quadratisch, so dass als Bauraum eine rechteckige Fläche bzw. ein Quader zur Verfügung steht. Als Zielfunktion soll das Gewicht minimiert werden, wobei eine maximale Durchbiegung der Kragarmspitze als Restriktion vorgeschrieben wird. Das Ausgangsvolumen beträgt 90 dm<sup>3</sup> bei einer maximalen Durchbiegung von 0.16 mm und einer maximalen Spannung von 13.2 N/mm<sup>2</sup>. Der Kragträger wird zunächst als zweidimensionales FE-Modell optimiert.

Zwei Ergebnisse der zweidimensionalen Topologieoptimierung sind in Bild 1b und 1c zu sehen.

Die Farbrasterung entspricht einer künstlichen Dichteverteilung des Materials zwischen 0 und 1. Elemente mit dem Wert 0 (dunkelblau) können entfernt werden, Elemente mit dem Wert 1 (rot) müssen erhalten bleiben. Bei den Zwischenwerten muss entschieden werden, welche Dichtestufen bei der Umsetzung des jeweiligen Vorentwurfs in eine Konstruktion noch mit berücksichtigt werden soll.

a)



b)



c)



Bild 1: a) Kragträger, b) künstliche Dichteverteilung, c) künstliche Dichteverteilung mit Fertigungsrestriktion

In Bild 1b wurde die Optimierung ohne Fertigungsrestriktionen durchgeführt, in Bild 1c wurde eine minimale Stegbreite vorgeschrieben. Man kann gut erkennen, dass im 2. Ergebnis die dünnen Stege der 1. Optimierung zusammengefasst wurden. Da die 2. Variante offensichtlich fertigungsgerechter ist, wird im Weiteren nur noch dieses Resultat verwendet. Bild 2a zeigt eine mögliche konstruktive Umsetzung der optimierten Designvariante nach Bild 1c in ein fertigungsgerechtes Bauteil.

Dieser Entwurf muss abschließend mit Hilfe einer FEM-Berechnung analysiert und bewertet werden, Bild 2b.

a)



b)

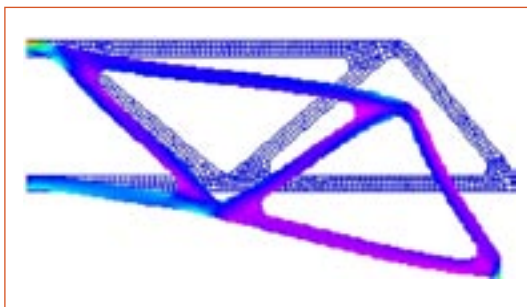


Bild 2: a) Konstruktive Umsetzung der optimierten Designvariante des Kragträgers, b) FEM-Berechnung

Durch die Optimierung ist das Volumen auf 26.7 dm<sup>3</sup> gesunken. Die maximale Durchbiegung hat sich dabei auf 0.43 mm und die maximale Spannung auf 59.4 N/mm<sup>2</sup> erhöht, was beides aber im zulässigen Bereich liegt, so dass die Optimierung sehr erfolgreich war.

In Bild 3 ist die zweidimensionale Optimierung eines Ösenhakens dokumentiert. Links ist das FE-Modell des Hakens zu erkennen.

Die Farbverteilung gibt hier wiederum die Verteilung der künstlichen Dichte zwischen 0 und 1 an.

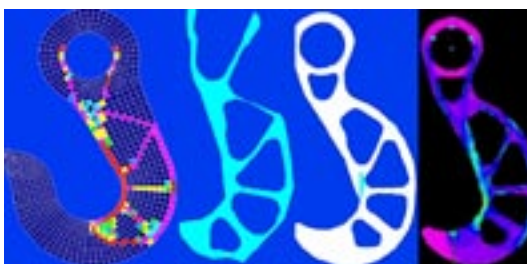


Bild 3: Optimierung eines Ösenhakens

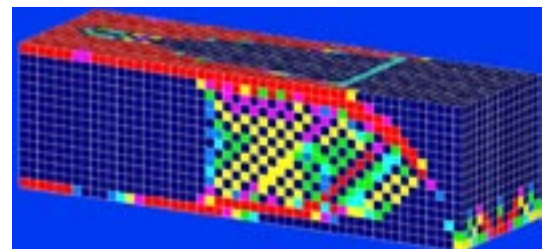
Mit Hilfe eines automatisierten Glättungsalgorithmus wird aus der Dichteverteilung eine Fläche gebildet, die alle Elemente bis zu einer ausgewählten Dichtestufe enthält. Zusätzlich werden die äußeren Ränder dieser Fläche geglättet. Im dritten Schritt wird aus dieser automatisch erzeugten Fläche die neue Konstruktion des Hakens abgeleitet.

Hierbei müssen konstante Stegbreiten, Ausrundungsradien und sonstige sinnvolle konstruktive Erweiterungen berücksichtigt werden. Diese Neukonstruktion wird dann im letzten Schritt mit Hilfe einer erneuten FE-Analyse überprüft.

Liegen alle Spannungen und Verformungen im zulässigen Bereich, so ist die Optimierung abgeschlossen. Die Neukonstruktion ist in Bild 3 ganz rechts dargestellt. Offensichtlich ist diese wesentlich leichter als die ursprüngliche Konstruktion, so dass das Ziel der Optimierung erreicht ist.

Der Kragträger aus Bild 1a wird nun dreidimensional betrachtet und mit Volumenelementen vernetzt. Das Ergebnis dieser Topologieoptimierung zeigt Bild 4a. Werden wiederum alle Elemente bis zu einer ausgewählten Dichtestufe ausgeblendet, so erhält man als Vorentwurf den 3D-Kragträger in Bild 4b.

a)



b)



Bild 4: a) Künstliche Dichteverteilung des 3D-Kragträgers, b) Vorentwurf des 3D-Kragträgers

Hieraus muss wiederum mit Hilfe eines CAD-Systems eine fertigungsgerechte Konstruktion abgeleitet werden. Dass dies nicht eindeutig ist, zeigt Bild 5 - alle drei Vorentwürfe sind mögliche Konstruktionen, die sich aber teilweise in gravierenden Details unterscheiden.

a)



b)



c)



Bild 5: Drei mögliche Konstruktionen des 3D-Kragträgers

Wie man hieraus leicht erkennen kann, lassen sich eine Vielzahl von Konstruktionsvarianten aus dem Optimierungsentwurf ableiten, so dass hier weitere Restriktionen, wie z. B. Fertigungsverfahren, Fertigungskosten, Sicherheitsaspekte usw. einfließen können. Dies gilt aber auch schon für die eigentliche Topologieoptimierung, bei der ebenfalls Fertigungsrestriktionen wie z. B. minimale Stegbreiten oder Entformungs-

richtungen berücksichtigt werden können. Die abschließende FEM-Analyse kann dabei eine wichtige Rolle spielen, die richtige Entscheidung für eine Variante zu treffen. In Bild 6 sind die Verformungen und Spannungen eines der möglichen Konstruktionsvorschläge angegeben. Die Verformungen sind dabei stark überhöht dargestellt, um das Steifigkeitsverhalten besser demonstrieren zu können.

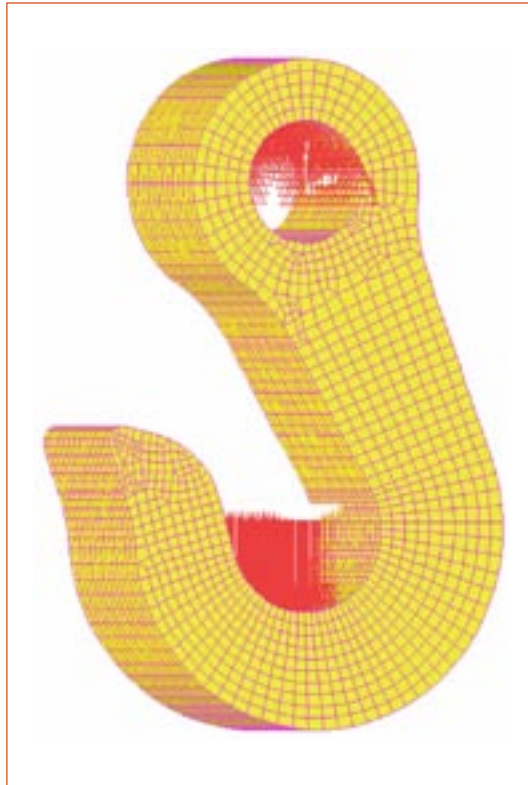


Bild 6: FE-Analyse des Kragträgers mit einer Einzellast

Das Volumen beträgt in diesem Fall 20.5 dm<sup>3</sup> und liegt bei Einhaltung der Verformungs- und Spannungsrestriktionen unterhalb der 2D-Optimierung. Vergleicht man die hier aufgezeigten Ergebnisse, so kann man zusammenfassend sagen, dass sich die Topologieoptimierung bewährt hat. Das Volumen des Kragträgers ist von 90 dm<sup>3</sup> auf ca. 1/5 reduziert worden.

Das zweite Bauteil, welches mit einer dreidimensionalen Topologieoptimierung neu entworfen werden soll, ist der bereits erwähnte Ösenhaken. In Bild 7a ist der zur Verfügung stehende Baureaum dargestellt. Als Lastfall wird vereinfachend lediglich eine senkrecht nach unten wirkende Zuglast angenommen, so dass Windlasten, das Pendeln des Hakens oder andere Beanspruchungen in einer ersten Optimierung nicht berücksichtigt werden. Ebenso wird die Aufhängung völlig offen gelassen, um auch hier eventuell neue Konstruktionsmöglichkeiten ableiten zu können. Bei Bedarf können natürlich an diesen Stellen sog. non-design-Bereiche definiert werden, so dass dann dort keine Optimierung durchgeführt wird und die Geometrie erhalten bleibt. Dies kann besonders für Anschlusskonstruktionen äußerst wichtig sein.

a)



c)



b)

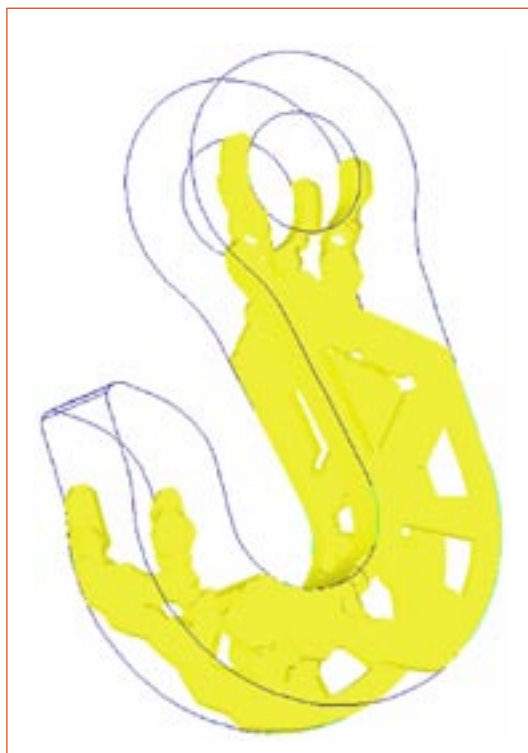


Bild 7: a) Bauraum des Ösenhakens, b) Topologieoptimierung, c) konstruktive Umsetzung

Auch an diesem Beispiel zeigt sich, dass mit Hilfe der Topologieoptimierung (Bild 7b) eine völlig neue Konstruktion (Bild 7c) entstehen kann, die wesentlich leichter ist als die Ausgangskonstruktion.

#### Optimierung mit unbegrenzten Möglichkeiten - "OPIUM"

"OPIUM" ist ein sehr leistungsfähiges FEM-System zur Festigkeitsanalyse, Eigenfrequenzanalyse und Strukturoptimierung von Bauteilen des Maschinenbaus, der Fahrzeugtechnik und des Bauwesens. Der Name steht für „Optimierung mit unbegrenzten Möglichkeiten“, da es durch seinen modularen Aufbau jederzeit auf Wunsch weiterentwickelt werden kann. Das FEM-System "OPIUM" ist vollständig an der FH Dortmund entwickelt worden. Es gibt keinerlei Einschränkungen in der Modellgröße, so dass auf jedem PC unter Windows FE-Analysen beliebiger Bauteile durchgeführt werden können. Durch genormte bzw. weitverbreitete Schnittstellen kann "OPIUM" mit zahlreichen anderen FEM- und CAD-Systemen Daten austauschen. Hierdurch ist eine Integration in bereits vorhandene FEM-Software-Umgebungen problemlos möglich. Besonders erwähnenswert ist der iterative

Gleichungslöser, der auch sehr große Gleichungssysteme äußerst schnell lösen kann. Dies wurde erforderlich, da **“OPIUM”** für Strukturoptimierungen komplexer Bauteile entwickelt worden ist, bei dem es durch die hierfür notwendigen Iterationen sonst zu nicht mehr akzeptablen Rechenzeiten gekommen wäre. Ein ausführliches Referenzhandbuch, ein umfangreiches Programmierhandbuch und zahlreiche Testbeispiele ermöglichen den einfachen und schnellen Zugang sowohl zur Anwendung als auch zur Weiterentwicklung von **“OPIUM”**.

**“OPIUM”** stellt Linien-, Flächen- und Volumenelemente zur Verfügung. Als Linienelemente können Stabelemente CROD für Fachwerke und Balkenelemente CBAR für Rahmentragwerke eingesetzt werden. Mit Hilfe der Dreieckscheibenelemente CTRIA3, der Dreieckplattenelemente PLATE3 und der Viereckschalenelemente CQUAD4 und CQUADR können alle Flächentragwerke analysiert werden. Für volumenhafte Bauteile stehen schließlich Tetraeder CTETRA, Pentaeder CPENTA und Hexaeder CHEXA zur Verfügung. Als Sonderelement für rotationssymmetrische Bauteile kann schließlich noch das Dreieckselement CTRIA3 verwendet werden. Somit existiert eine umfangreiche Elementbibliothek, mit der Bauteile bezüglich des Festigkeits- und des Eigenschwingungsverhaltens analysiert und anschließend optimiert werden können. Für die Bauteiloptimierung steht die Parameteroptimierung und die Topologieoptimierung zur Verfügung.

Bei der Parameteroptimierung werden charakteristische Parameter der Bauteile automatisch variiert. Dies können Querschnittsflächen von Fachwerkstäben, Flächenträgheitsmomente von Rahmenbauteilen, Wandstärken von Behältern u.ä. sein. Bild 8 zeigt die Parameteroptimierung eines Kranauslegers mit **“OPIUM”**. Das FEM-Modell besteht aus 54 Stabelementen vom Typ CROD. Als Designvariablen werden die 54 Querschnittsflächen der Stäbe eingeführt.

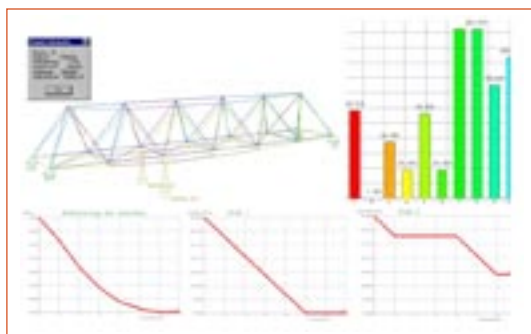
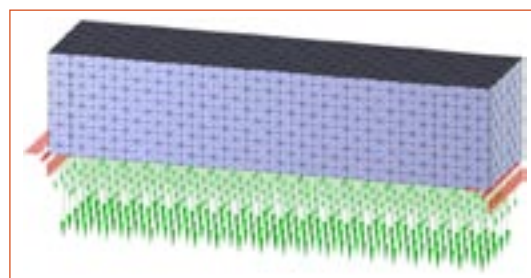


Bild 8: Parameteroptimierung eines Kranauslegers mit **“OPIUM”**

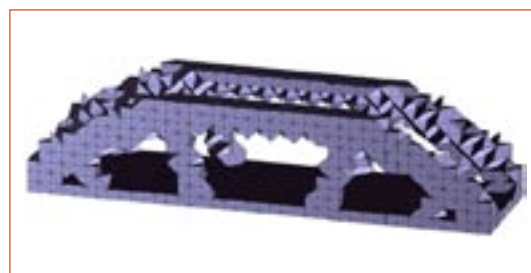
Mit Hilfe der in **“OPIUM”** integrierten Fully-Stress-Design-Methode konnte das Gewicht des Kranauslegers auf ca. 60 % gesenkt werden. Dies wurde durch die automatische Reduzierung der Ausgangsquerschnittsflächen erreicht, so dass alle Stäbe ausdimensioniert sind. Vergleichsrechnungen mit MSC/NASTRAN zeigen, dass die Ergebnisse richtig sind. Im Zusammenhang mit der Parameteroptimierung von Stabtragwerken besitzt **“OPIUM”** die Besonderheit, dass auf Wunsch auch das Knickverhalten der auf Druck beanspruchten Stäbe berücksichtigt werden kann.

Bei der Topologieoptimierung wird - wie bereits oben gezeigt - von einem zulässigen Bauraum des zu konstruierenden Bauteils ausgegangen. Aufgrund von Belastungen und Lagerungen wird automatisch ein Vorentwurf berechnet. Diese - der Konstruktion vorgeschaltete - Optimierung ermöglicht vollständige Neukonstruktionen und hat damit häufig die größte Gewichtsersparnis zur Folge. Als Optimierungsstrategien sind in **“OPIUM”** integriert: „Optimality Stress Criteria“, „Optimality Compliance Criteria“, „Fully Stress Design“, „Methode nach Mattheck“, „Methode nach Mattheck mit Schrittweitensteuerung“. Zusätzlich wurde ein sog. „checkerboard-Filter“ implementiert, der die sonst typischerweise auftretenden schachbrettartigen Muster in den Resultaten unterdrückt. Als Beispiel wird die in Bild 9 dargestellte Brücke optimiert. Bild 9a zeigt den Bauraum, der mit 20000 Tetraederelementen vernetzt wurde.

a)



b)



c)

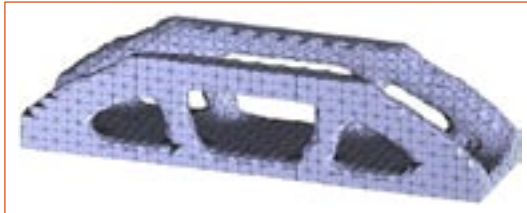


Bild 9: Topologieoptimierung einer Brücke mit **“OPIUM“**: a) Bauraum, b) Optimierter Vorentwurf, c) Geglätteter Vorentwurf

Bild 9b zeigt das sehr zufriedenstellende Ergebnis dieser Topologieoptimierung mit **“OPIUM“**. Der letzte notwendige Schritt für die konstruktive Umsetzung der optimierten Designvariante in ein fertigungsgerechtes Bauteil ist in Bild 9c dargestellt. Hier ist mit einem neu in **“OPIUM“** integrierten Glättungsmodul die Oberfläche geglättet worden. Zur Verfügung stehen hier ebenfalls mehrere Methoden. Auch dies zeigt, dass es äußerst sinnvoll ist, ein FEM-System wie **“OPIUM“** selbst zu entwickeln, um eigene Ideen und Methoden direkt anwenden zu können.

#### Zusammenfassung und Ausblick

Allgemeine FEM-Software wird mittlerweile in fast allen Gebieten der Technik eingesetzt, so dass die Finite-Elemente-Methode die Standardmethode zur Berechnung von Bauteilen der Fahrzeugtechnik und des Maschinenbaus darstellt. Die computergestützte Optimierung komplexer Komponenten dagegen ist zur Zeit in der Entwicklung. Erste Erfahrungen in der Anwendung von Optimierungsoftware wurden gemacht, es sind aber auch noch viele Fragen offen.

Hier zeigt sich gerade in letzter Zeit ein deutlicher Trend zur Topologieoptimierung ab, da bei dieser Optimierungsart das größte Potential zur Gewichtsreduzierung liegt. Sowohl Flächen- als auch Volumenbauteile können bezüglich ihrer Topologie optimiert werden. Gerade die Fahrzeugindustrie versucht zur Zeit, erste praxisrelevante Serienbauteile zu optimieren.

Als aktuelle Fragestellung hat sich vor allem ergeben, wie man aus den optimierten Designvarianten fertigungsgerechte Konstruktionen ableiten kann. Die Lösung dieser Problematik ist für den praktischen Einsatz der computergestützten Bauteiloptimierung und damit für den Leichtbau unbedingt erforderlich. Genau hier liefert das an der FH Dortmund entwickelte Optimierungssystem **“OPIUM“** einen wertvollen Beitrag, da aufgrund

der Verfügbarkeit des Quellcodes schnell und einfach neue Ideen und Lösungsmethoden realisiert werden können.

Ein großes Problem ist weiterhin die Umsetzung dreidimensionaler Designvarianten. Eine wesentliche Vereinfachung liefert hier der Einsatz eines sog. „3D-Druckers“. Mit Hilfe dieses Rapid-Prototyping-Verfahrens ist es sehr schnell und preiswert möglich, beliebige dreidimensionale Strukturen herzustellen. Damit ist eine konstruktive Umsetzung der mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode optimierten Designvarianten in fertigungsgerechte Bauteile wesentlich leichter möglich. Der Weg von der Idee zum fertigen Produkt ist somit im Leichtbau-Technologie-Center LTC der FH Dortmund in kürzester Zeit realisierbar.

#### Vorträge im Zusammenhang mit dem Projekt

- Fischer, W., Strategies to Optimize Products, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, 31.08.2001
- Fischer, W., Comparison of Topology Optimization with Altair OptiStruct and MSC. Construct, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, 03.09.2001
- Fischer, W., Einfluss verschiedener Parameter auf das Optimierungsergebnis einer Topologieoptimierung, 1. Altair Technology Seminar, Stuttgart, 29.11.2001
- Fischer, W., Bauteiloptimierung mit FEM und CAD - Von der Idee zum Produkt-Konstrukteurstage CLAASGUSS, Gütersloh, 07.10.2002
- Fischer, W., Entwicklung und Bau des durch Muskelkraft angetriebenen Leichtbaufahrzeuges eLTec MP unter Einsatz computergestützter Methoden, SPEZI 2003, Germersheim, 26.04.2003
- Fischer, W., Von der virtuellen Produktentwicklung zum realen Prototypen am Beispiel des Leichtbaufahrzeuges „eLTec MP“, Virtual Product Development Conference, Bad Neuenahr, 24.06.2003
- Fischer, W., Von der virtuellen Produktentwicklung zum realen Prototypen am Beispiel des Leichtbaufahrzeuges „eLTec MP“, Euromold, Frankfurt, 04.12.2003
- Fischer, W., Bauteiloptimierung mit Hilfe der FEM - Möglichkeiten, Anwendungen und Grenzen, Congress Intelligen-

- te Leichtbau Systeme, Wolfsburg, 14.09.2004
- Fischer, W. Von den Anfängen der Finite-Elemente-Methode zur Virtuellen Produktentwicklung - ein Überblick über die historische Entwicklung von Berechnungs- und Simulationswerkzeugen, 2. CAE-Forum Brunch & Learn - Antrieboptimierung mit Simulationswerkzeugen, Würzburg, 31.05.2005
- Veröffentlichungen im Zusammenhang mit dem Projekt**
- Bense, D., Numerische Bauteiloptimierung unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten am Beispiel eines Sturzlenkers, FH Dortmund, 2003
- Fischer, W. Numerische Strukturoptimierung von Fahrwerksbauteilen mittels OptiStruct, FH Dortmund, 2001
- Bera, W., Einfluss verschiedener Parameter auf das Optimierungsergebnis einer Topologieoptimierung, 1. Altair Technology Seminar, 2001
- Fischer, W. Untersuchung der praktischen Anwendbarkeit von Optimierungsverfahren auf Bauteile des Maschinenbaus und der Fahrzeugtechnik, Forschungsbericht der FH Dortmund, 2002
- Fischer, W. Bauteiloptimierung mit FEM und CAD - Von der Idee zum Produkt Giesserei, 6/2003
- Fischer, W. Von der virtuellen Produktentwicklung zum realen Prototypen am Beispiel des Leichtbaufahrzeuges „eLTec MP“, Virtual Product Development Conference, 2003
- Fischer, W. Von der virtuellen Produktentwicklung zum realen Prototypen am Beispiel des Leichtbaufahrzeuges „eLTec MP“, Euromold, 2003
- Fischer, W. Leichtbau durch Strukturoptimierung mit FEM und CAD, Berufsakademie Berlin, 2004
- Fischer, W. Bauteiloptimierung mit Hilfe der FEM - Möglichkeiten, Anwendungen und Grenzen, Congress Intelligente Leichtbau Systeme, 2004
- Kleinewegen, St., Entwicklung eines Programmes zur Topologieoptimierung von Bauteilen
- Fischer, W. mit der Finite-Elemente-Methode, FH Dortmund, 2000
- Rohaut, A., Optimierung eines Leichtbaufahrzeuges unter Einsatz von CAE, FH Dortmund, 2003
- Fischer, W. Stibale, M., Optimierung und Konstruktion einer LKW-Kabinenanbindung mit Hilfe von Altair/OptiStruct, FH Dortmund, 2003
- Fischer, W. Topal, F., Strukturoptimierung eines Getriebegehäuses mit PERMAS unter Berücksichtigung von Kontaktelementen, FH Dortmund, 2002
- Weinert, P., Entwicklung einer Software zur automatischen Glättung topologieoptimierter dreidimensionaler FEM-Strukturen, FH Dortmund, 2002
- Messebeteiligungen im Zusammenhang mit dem Projekt**
- TRAFO 2001 Neuere Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Strukturoptimierung TRAFO-Auftaktveranstaltung, FH Dortmund, 28.05.2001
- effét 2002 Bauteiloptimierung mit FEM und CAD, Forschungs- & Entwicklungstage an der FH Dortmund, 27.11.2002
- effét 2002 OPIUM - Optimierung mit unbegrenzten Möglichkeiten, Forschungs- & Entwicklungstage an der FH Dortmund, 27.11.2002
- CeBIT 2003 OPIUM - Optimierung mit unbegrenzten Möglichkeiten, Hannover, 12.03.2003 - 19.03.2003
- SPEZI 2003 Leichtbaufahrzeug „eLTec MP“, Gernsheim, 26.04.2003 - 27.04.03