

Wilfried Fischer

## Leichtbau in der Fahrzeugtechnik durch CAD, FEM, Optimierung und Rapid Prototyping

### Abstract

Der Leichtbau von Konstruktionen und damit die genaue Ausdimensionierung einzelner Komponenten setzt sich in der Fahrzeugtechnik immer stärker durch. Im Beitrag wird zunächst dargestellt, wie mit Hilfe verschiedener Strategien und Methoden eine Optimierung der Bauteile bezüglich des Gewichtes, des Steifigkeits- oder des Schwingungsverhaltens erzielt werden kann. Anschließend wird erläutert, wie die beschriebenen Leichtbaustrategien im Leichtbau-Technologie-Center der Fachhochschule Dortmund im Zuge der Entwicklung von Liegerädern mit Elektro-Hilfsmotor sowie weiterer Leichtbaufahrzeuge angewendet werden.

### Inhalt

1. Einleitung
2. Leichtbau durch CAD, FEM, Optimierung und Rapid Prototyping
3. Parameteroptimierung
4. Formoptimierung
5. Topologieoptimierung
6. Die Leichtbau-Fahrzeuge *eLTeC*

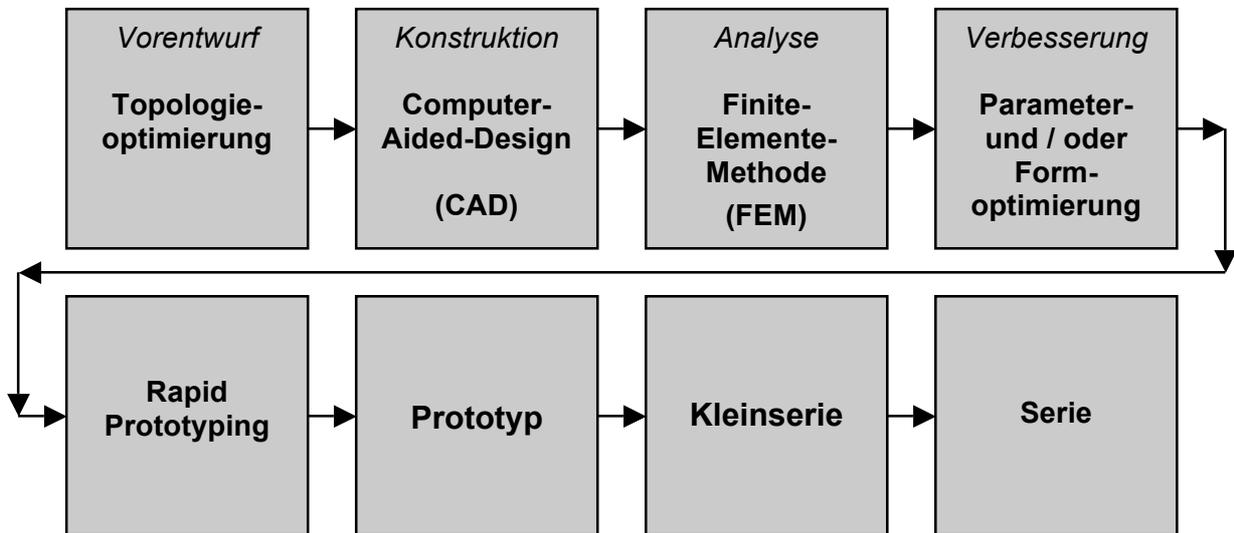
### 1. Einleitung

Fahrzeugbau ohne Leichtbau ist in heutiger Zeit nicht mehr denkbar. Das Gewicht der Fahrzeuge ist u. a. für den Energieverbrauch, die Fahrdynamik, das Umweltverhalten und den Komfort maßgeblich mit entscheidend. Die Reduzierung des Fahrzeuggewichtes durch Leichtbaumaßnahmen spielt somit eine zentrale Rolle bei der Entwicklung heutiger Fahrzeuge. Neben konstruktiven und werkstoff-, fertigungs- und messtechnischen Möglichkeiten werden rechnergestützte Verfahren zur Optimierung aller Bauteile mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) eingesetzt, um alle Leichtbaupotentiale auszuschöpfen. 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 und die rechnergestützte Optimierung zurückgegriffen. Mit Hilfe verschiedener Optimierungsstrategien wird hierbei im Zusammenhang mit der FEM eine automatische Optimierung der Bauteile bezüglich des Gewichtes, des Steifigkeits- oder des Schwingungsverhaltens durchgeführt.

## 2. Leichtbau durch CAD, FEM, Optimierung und Rapid Prototyping

Die Prozesskette vom optimierten Vorentwurf zum fertigungsgerechten Serienbauteil zeigt Bild 1.

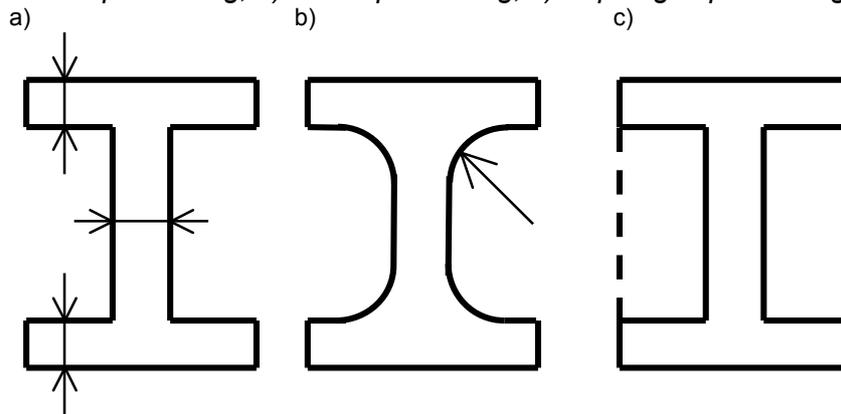
Bild 1: Leichtbau durch CAD, FEM, Optimierung und Rapid Prototyping: Von der Idee zum Produkt



Zunächst wird mit Hilfe der Topologieoptimierung ein Vorentwurf des Bauteils entwickelt. Daraus kann dann durch Einsatz eines CAD-Systems eine erste Konstruktion abgeleitet werden. Diese wird anschließend mit einem FEM-System analysiert. Weitere Verbesserungen können durch eine Parameteroptimierung und eine Formoptimierung erfolgen. Die so erreichte optimale Konstruktion wird mit Hilfe eines Rapid-Prototyping-Verfahrens überprüft. Ist bis zu diesem Stadium alles zufriedenstellend, kann der erste Prototyp gefertigt werden. Hieran schließt sich nach umfangreichen Tests eine Kleinserie an, die die Alltagstauglichkeit beweisen muss. Am Ende der Prozesskette steht schließlich die Serienfertigung des nun auch unter Leichtbauaspekten optimalen Bauteils.

Eine wichtige Rolle in dieser Prozesskette spielen die verschiedenen Optimierungsverfahren. Analytische Verfahren, wie z. B. die Lagrange Multiplikatorenmethode, können mathematisch geschlossen nur für sehr einfache Bauteile eingesetzt werden. Für Fahrzeugkomponenten, die meistens sehr komplexe Geometrien aufweisen, kann die Optimierung nur noch näherungsweise mit Hilfe der FEM durchgeführt werden. Hier unterscheidet man häufig zwischen „Parameteroptimierung“, „Formoptimierung“ und „Topologieoptimierung“. Bild 2 zeigt die prinzipiellen Unterschiede dieser drei Optimierungsstrategien.

Bild 2: a) Parameteroptimierung, b) Formoptimierung, c) Topologieoptimierung



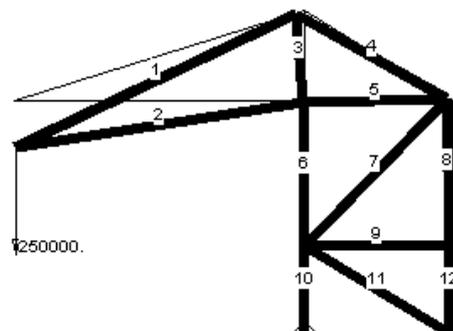
In Bild 2a ist ein Beispiel zur Parameteroptimierung dargestellt. Hier wird automatisch durch das FEM-System die Stegbreite und die Flanschdicke variiert, bis ein Optimum bezüglich der gewünschten Anforderungen erreicht ist. Bild 2b zeigt eine typische Formoptimierung, bei der die äußere Form durch Veränderung von Ausrundungsradien an die Beanspruchungen angepasst wird. Ein Beispiel für die Topologieoptimierung wird schließlich durch Bild 2c erläutert. Hierbei wird der maximal zur Verfügung stehende Bauraum modelliert und solange verändert, bis nur noch die optimale Form übrig bleibt. Im Folgenden werden die drei Optimierungsstrategien an einfachen Beispielen näher erläutert.

### 3. Parameteroptimierung

Bei der Parameteroptimierung werden charakteristische Parameter der Bauteile automatisch variiert. Dies können Querschnittsflächen von Querlenkern, Flächenträgheitsmomente von Rahmenbauteilen, Wandstärken von Karosseriebauteilen u. ä. sein.

Zunächst wird an einem Kran als Beispiel eines einfachen Stabfachwerkes, Bild 3, gezeigt, wie eine Parameteroptimierung durchgeführt werden kann. Der Ausgangsquerschnitt aller Fachwerkstäbe dieses Krans beträgt  $20.000 \text{ mm}^2$ . Als Designvariablen werden die zwölf Querschnittsflächen der Stäbe definiert. Sie sollen unabhängig voneinander zwischen  $0,1 \text{ mm}^2$  und  $20.000 \text{ mm}^2$  variiert werden können. Die Verschiebung des Kraftangriffsknotens soll in Krafrichtung höchstens  $20 \text{ mm}$  betragen dürfen. Die ursprüngliche Masse beträgt  $4.850 \text{ kg}$ .

Bild 3: Verformtes und unverformtes Original-Fachwerk mit zwölf Stäben aus Stahl



Die Axialspannungen des Original-Fachwerkes sind in Bild 4a angegeben. Ihre Werte sind zwischen der größten Druck- und Zugspannung annähernd gleichmäßig

verteilt. Bild 4b zeigt das optimierte Fachwerk. Vergleicht man die Axialspannungen der einzelnen Stäbe, so stellt man fest, dass die Spannungen der Stäbe im optimierten Fachwerk entweder etwa den gleichen Betrag haben oder fast gleich Null sind. Somit ist dieses Fachwerk ausdimensioniert. Eine zulässige Spannung wurde bei der hier durchgeführten Optimierung als Restriktion nicht angegeben, so dass der Maximalwert der Axialspannung im Vergleich zum Original-Fachwerk leicht ansteigt. Würde man zusätzlich die Spannung auf eine obere Grenze festlegen, würde diese natürlich entsprechend berücksichtigt.

Bild 4: a) Axialspannungen des Original-Fachwerkes, b) Optimiertes Fachwerk

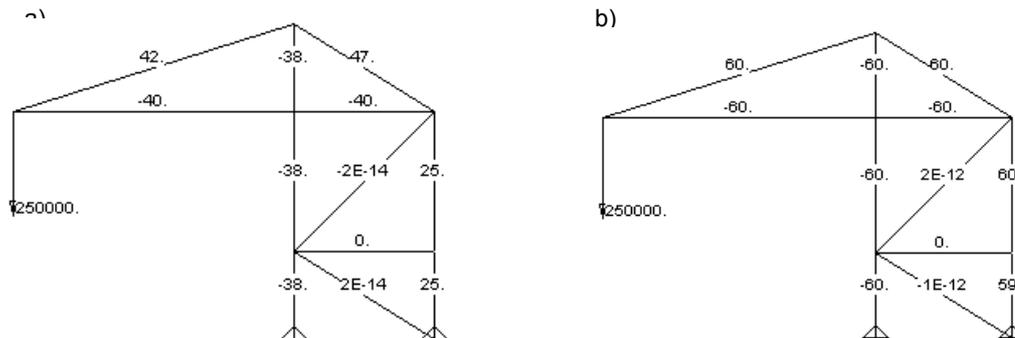
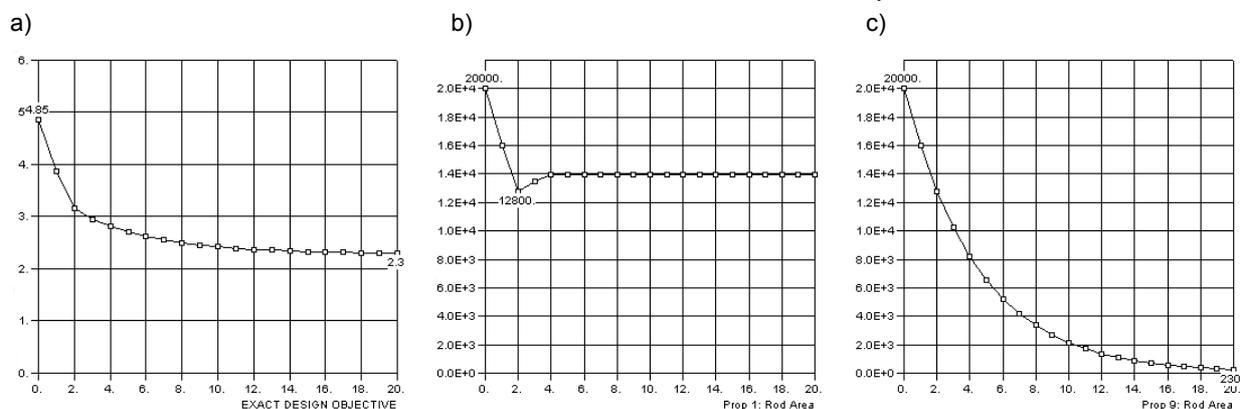


Bild 5a zeigt die Masse des Fachwerkes im Verlauf der Iteration. Man erkennt, dass das optimierte Fachwerk nur noch eine Masse von 2.300 kg hat.

Bild 5: Masse und Querschnittsflächen des 1. und 9. Stabes des optimierten Fachwerkes



Die Bilder 5b und 5c zeigen exemplarisch, wie der Optimierungsalgorithmus die Querschnittsflächen der Stäbe 1 und 9 beeinflusst hat. Die Fläche des Stabes 1 als hoch belasteter Stab wurde auf einen relativ hohen Wert von 13.992 mm<sup>2</sup> verändert. Die Fläche des Stabes 9, bei dem es sich um einen Nullstab handelt, wurde auf einen Wert von 230 mm<sup>2</sup> reduziert, d. h. also praktisch auf Null gesetzt. Alle anderen Stäbe, die hier nicht weiter aufgeführt werden, haben die jeweils erforderlichen Querschnittswerte erhalten. Am Vergleich der Massen erkennt man, dass die Optimierung in diesem Fall sehr effektiv war.

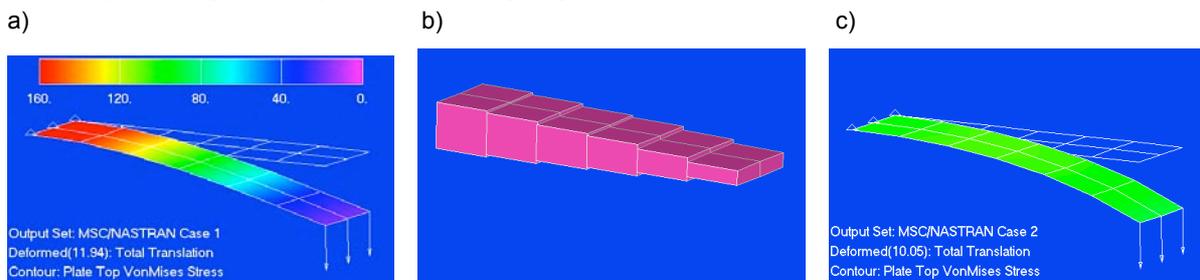
Die Parameteroptimierung kann natürlich auch für Flächentragwerke wie z. B. Karosseriebauteile eingesetzt werden. In Bild 6a ist das Schalenelement-Modell eines Kragträgers mit konstanter Dicke im unverformten und verformten Zustand dargestellt. Zusätzlich ist die Vergleichsspannungsverteilung nach von Mises auf der Scha-

lenoberseite eingetragen. Die Abnahme der Spannungen von der Einspannung links zum rechten Lastrand hin ist ebenfalls erkennbar. Die maximale Durchbiegung an der Kragarmspitze beträgt 11,94 mm bei einer Gesamtlänge des Trägers von  $l = 1.000$  mm.

Dieser Träger soll nun so optimiert werden, dass sein Gewicht minimal wird. Für die beiden jeweils benachbarten Schalelemente in Breitenrichtung soll bei der Optimierung die gleiche Dicke bestimmt werden, was durch Definition je eines einzigen Querschnittswertes für die beiden Nachbarelemente gewährleistet wird. Damit erhält man für die sechs möglichen Schalendicken sechs Designvariablen, die zwischen 0,1 mm und 100 mm variiert werden sollen. Als Restriktion wird eine maximale Durchbiegung an der Kragarmspitze von  $w_{zul} = 10$  mm vorgegeben.

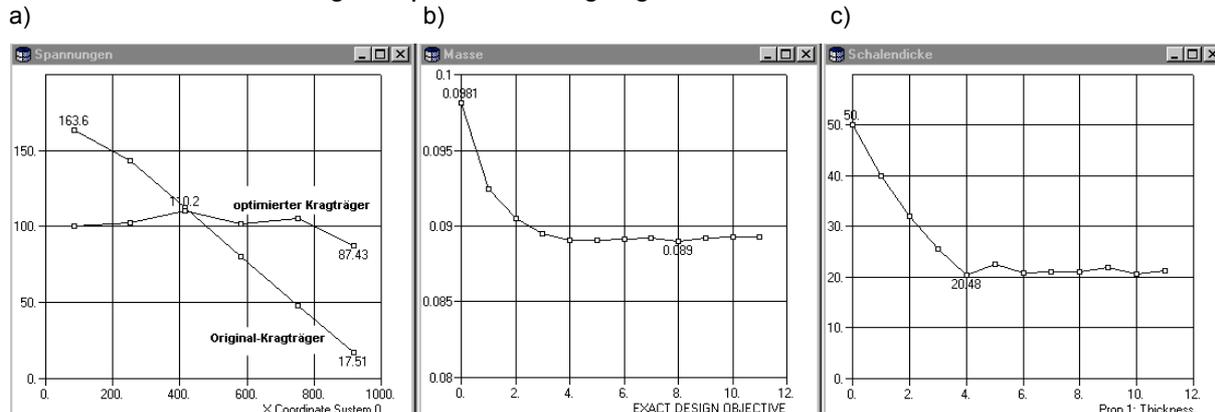
Die Bilder 6b und 6c zeigen sehr anschaulich das Ergebnis dieser Optimierung. Im Bereich hoher Spannungen an der Einspannstelle wird die Schalendicke bei der Optimierung automatisch vergrößert und im Bereich niedriger Spannungen an der Kragarmspitze dementsprechend verringert.

**Bild 6:** a) Kragträger mit konstanter Dicke, b) Optimierter Kragträger, c) Verschiebungen und Spannungen im optimierten Kragträger



Die Veränderung des Spannungsverlaufs in Abhängigkeit von der x-Koordinate wird in Bild 7a verdeutlicht. Die Spannungen nehmen im Original-Träger von der Einspannung nach rechts zum freien Rand hin praktisch linear ab. Im optimierten Kragträger dagegen sind die Spannungen an allen Stellen nahezu gleich, was bedeutet, dass er überall optimal ausdimensioniert ist. Die Masse sinkt durch die Optimierung von 98,1 kg in 11 Iterationsschritten auf 89 kg, Bild 7b. Wie dabei die Schalendicke variiert wird, zeigt am Beispiel der beiden Schalelemente an der Kragarmspitze Bild 7c.

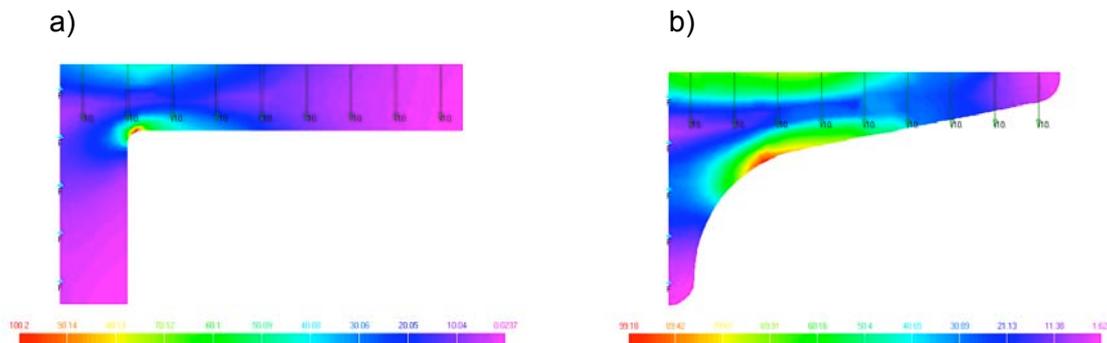
**Bild 7:** a) Vergleichsspannungen in Abhängigkeit von der x-Koordinate, b) Masse und c) Schalendicke an der Kragarmspitze des Kragträgers im Verlauf der Iteration



#### 4. Formoptimierung

Die Formoptimierung eignet sich besonders zur Reduzierung von örtlichen Spannungsspitzen. Hierbei werden die äußeren Konturen der Bauteile automatisch verändert, wie es in Bild 8 durch Vergrößerung der Ausrundung zum Abbau von Kerbspannungen dargestellt ist.

Bild 8: Formoptimierung einer Winkelstütze: a) Ausgangskonstruktion, b) Optimierte Konstruktion



Das Gewicht wird durch diese Optimierung bei konstanter Spannung auf ca. 1/3 reduziert.

#### 5. Topologieoptimierung

Zunächst wird wiederum ein einseitig eingespannter Kragträger mit einer Einzellast optimiert, Bild 9a. 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  $90 \text{ dm}^3$  bei einer maximalen Durchbiegung von  $0.16 \text{ mm}$  und einer maximalen Spannung von  $13.2 \text{ N/mm}^2$ . Der Kragträger wird zunächst als zweidimensionales FEM-Modell optimiert.

Das Ergebnis der Topologieoptimierung ist in Bild 9b 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 Dichtestufe bei der Umsetzung des jeweiligen Vorentwurfs in eine Konstruktion noch berücksichtigt werden soll.

Bild 9: a) Kragträger, b) künstliche Dichteverteilung

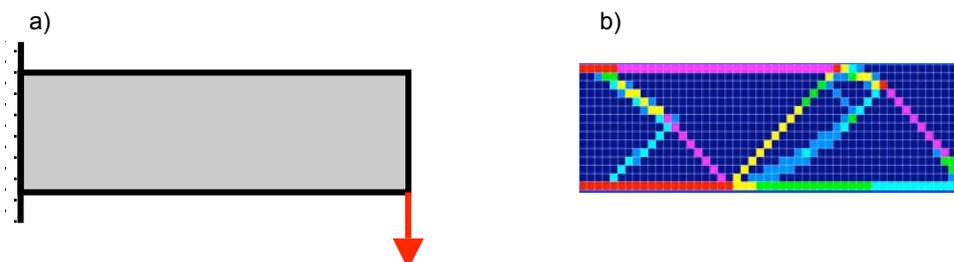
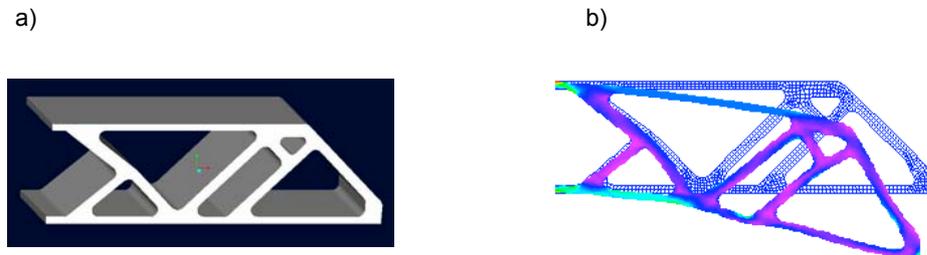


Bild 10a zeigt eine mögliche konstruktive Umsetzung der optimierten Designvariante. Dieser Entwurf wird abschließend mit Hilfe einer FEM-Berechnung analysiert und bewertet, Bild 10b.

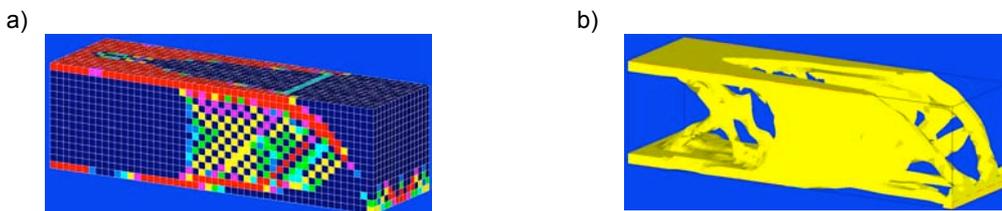
*Bild 10 a) Konstruktive Umsetzung der optimierten Designvariante des Kragträgers, b) FEM-Berechnung*



Durch die Optimierung ist das Volumen auf 28 dm<sup>3</sup> gesunken. Die maximale Durchbiegung hat sich dabei auf 0.49 mm und die maximale Spannung auf 56 N/mm<sup>2</sup> erhöht, was beides aber im zulässigen Bereich liegt, so dass die Optimierung sehr erfolgreich war.

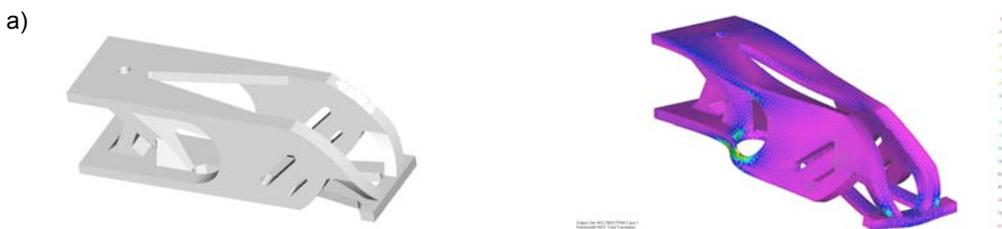
Der Kragträger aus Bild 9a wird nun dreidimensional betrachtet und mit Volumenelementen vernetzt. Das Ergebnis dieser Topologieoptimierung zeigt Bild 11a. Werden alle Elemente bis zu einer ausgewählten Dichtestufe ausgeblendet, so erhält man als Vorentwurf den 3D-Kragträger in Bild 11b.

*Bild 11: a) Künstliche Dichteverteilung des 3D-Kragträgers, b) Vorentwurf des 3D-Kragträgers*



Hieraus muss wiederum mit Hilfe eines CAD-Systems eine fertigungsgerechte Konstruktion abgeleitet werden, Bild 12a. In Bild 12b sind die Verformungen und Spannungen angegeben. Die Verformungen sind dabei stark überhöht dargestellt, um das Steifigkeitsverhalten besser demonstrieren zu können.

*Bild 12: a) Abgeleitete Konstruktion des 3D-Kragträgers, b) FEM-Analyse des Kragträgers*



Das Volumen beträgt in diesem Fall ca. 20 dm<sup>3</sup> und liegt damit bei Einhaltung der Verformungs- und Spannungsrestriktionen unterhalb der 2D-Optimierung. Vergleicht man die hier aufgezeigten Ergebnisse, so kann man sagen, dass sich die Topologieoptimierung bewährt hat. Das Volumen bzw. das Gewicht des Kragträgers wurden auf ca. 1/5 reduziert.

## 6. Die Leichtbau-Fahrzeuge eLTeC

Seit dem Jahr 2002 werden im Leichtbau-Technologie-Center (LTC) der FH Dortmund die Leichtbau-Fahrzeuge **eLTeC** entwickelt. Hierbei werden u. a. die oben beschriebenen Leichtbau-Strategien eingesetzt und praktisch erprobt. Dabei wird darauf Wert gelegt, alle Schritte der in Bild 1 beschriebenen Prozesskette nach dem Motto des LTC „Von der Idee zum Produkt“ zu realisieren.

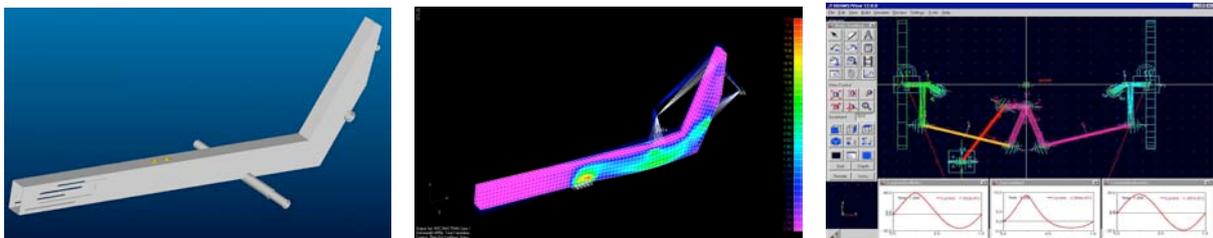
In Bild 13 ist das erste entwickelte Fahrzeug **eLTeC MP** zu sehen. Es handelt sich hierbei um ein Liegedreirad aus Edelstahl, welches durch einen Elektro-Hilfsmotor mit einer Leistung von 250 W angetrieben wird. Anfänglich hatte dieses Fahrzeug bei einem zulässigen Gesamtgewicht von 175 kg ein Gewicht von 30 kg.

*Bild 13: Das eLTeC MP – ein Liegedreirad mit Elektro-Hilfsmotor*



Durch den konsequenten Einsatz von CAD, FEM und MKS, Bild 14, entsteht ein Fahrzeug, welches in Fahrtests beweist, dass alle erforderlichen Funktionen erfüllt werden und dass die Fahreigenschaften hervorragend sind.

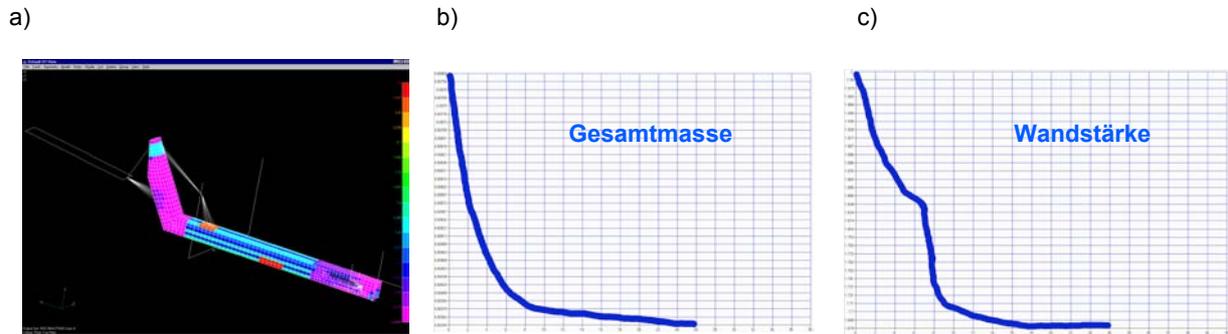
*Bild 14: Das eLTeC MP – virtuelle Produktentwicklung mit CAD, FEM und MKS*



Geradeauslauf, Kurvenfahrt, Lenk- und Bremsverhalten, Fahrkomfort und Fahrstabilität sind aufgrund der vorangegangenen virtuellen Produktentwicklung auf Antrieb sehr gut gelungen, so dass keine prinzipiellen Konstruktionsänderungen notwendig sind. Als nächster Entwicklungsschritt ergibt sich, den Rahmen bezüglich des Gewichtes zu optimieren, da er etwa 1/3 des Gesamtgewichtes beträgt.

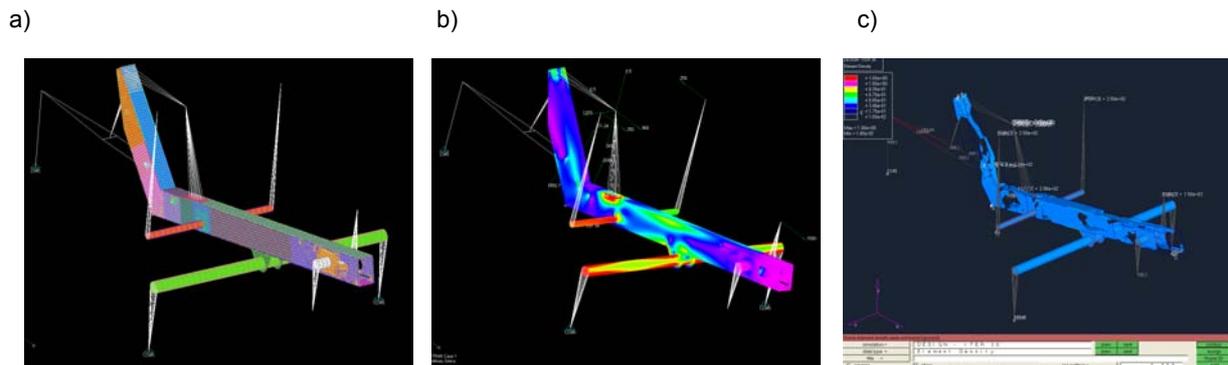
Führt man für den Rahmen eine Parameteroptimierung durch, so erhält man als Ergebnis die jeweils erforderliche Wandstärke des verwendeten Kastenprofils. Bild 15a zeigt farblich markiert die notwendigen Wandstärken, die hier schon unter Fertigungsgesichtspunkten leicht variiert worden sind. Theoretisch ist hierdurch eine Gewichtsreduzierung von 57 % möglich, Bild 15b. Die Herstellung dieses Spezialrahmens, der eine von den Beanspruchungszonen abhängige Wandstärke haben müsste, Bild 15c, wäre aber sehr aufwändig, so dass die Fertigung eines solchen Rahmens im Hinblick auf ein Serienfahrzeug nicht in Frage kommt.

**Bild 15:** a) Gewichtsreduzierung des eLTec MP - Rahmens durch Parameteroptimierung der Wandstärke, b) Reduzierung der Gesamtmasse, c) Reduzierung der Wandstärke



Das Ergebnis einer Topologieoptimierung des Rahmens zeigt Bild 16. Als Bauraum wird das Kastenprofil des Rahmens zugrunde gelegt. Mit Hilfe der Topologieoptimierung erhält man somit einen Vorschlag, an welchen Stellen Ausschnitte im Rahmen vorgesehen werden müssen, um bei vorgeschriebener Reststeifigkeit und -festigkeit eine Gewichtsreduzierung zu erreichen.

**Bild 16:** a) FEM-Modell, b) Festigkeitsanalyse und c) Topologieoptimierung des eLTec MP - Rahmens



Der von der Topologieoptimierung bestimmte Vorentwurf muss anschließend mit Hilfe eines CAD-Systems auskonstruiert werden, Bild 17a. Anschließend zeigt ein Rapid-Prototyping-Modell, Bild 17b, ob die Neukonstruktion fertigungsgerecht ausgestaltet ist. Zum Schluss kann der Prototyp hergestellt werden, Bild 17c. Dieser ist 30 % leichter als der ursprüngliche Rahmen. Das Gesamtgewicht des eLTec MP reduziert sich dadurch um 10 % auf 27 kg.

**Bild 17:** a) CAD-Modell, b) Rapid-Prototyping-Modell und c) Prototyp des optimierten eLTec MP - Rahmens



Das zweite Leichtbau-Fahrzeug, welches im LTC entwickelt wurde, ist das *eLTeC OV*, Bild 18. Durch zahlreiche konstruktive Leichtbaumaßnahmen und durch einen Werkstoffwechsel beim Rahmen, der jetzt aus belastungsgerecht angepassten Aluminiumlegierungen gefertigt ist, kann das Gesamtgewicht des Fahrzeuges auf etwa 25 kg reduziert werden. Die Fertigungskosten liegen jedoch um ein Vielfaches höher. Hier zeigt sich deutlich, dass Leichtbau häufig mit steigenden Kosten verbunden ist, so dass als Optimum immer eine wirtschaftliche Gesamtlösung angestrebt werden sollte.

*Bild 18: Das eLTeC OV – ein Liegedreirad aus Aluminium*



Im Jahr 2007 begann die Entwicklung des Elektro-Cityfahrzeuges *eLTeC FCX*. Ziel dieses Forschungs- und Entwicklungsvorhabens ist es, ein Fahrzeug für den Stadtverkehr zu entwickeln, welches durch Elektromotoren angetrieben wird. Die Entwicklung des Fahrzeuges wird unter besonderer Berücksichtigung des Leichtbaus durchgeführt, so dass mit sehr wenig Energie sehr gute Fahrleistungen erreicht werden. Als Energiequelle werden zur Zeit Blei-Gel-Akkus eingesetzt. Diese sollen in Zukunft durch eine Brennstoffzelle als Range Extender ergänzt werden. Die maximale Geschwindigkeit des Fahrzeuges beträgt ca. 50 km/h, so dass man innerorts am normalen Straßenverkehr teilnehmen kann. Das voll gefederte Fahrzeug hat mittlerweile eine vollständige Karosserie mit zwei Flügeltüren. Es bietet maximal zwei Erwachsenen Platz, wobei ein zusätzlicher Stauraum integriert wird.

Die ersten Überlegungen zur Entwicklung des Fahrzeuges gehen von einem vierrädrigen Fahrzeug aus. Da jedoch das Fahrzeug unter dem Gesichtspunkt des Leichtbaus entwickelt werden soll und fahrdynamische Untersuchungen zeigen, dass für eine Maximalgeschwindigkeit von 50 km/h drei Räder vollkommen ausreichend sind, wird als erste Leichtbaumaßnahme aufgrund des einzusparenden Gewichtes auf das 4. Rad verzichtet. In Anlehnung an die bisher entwickelten Fahrzeuge *eLTeC MP* und *eLTeC OV* entsteht somit als 1. Entwurf eines dreirädrigen Fahrzeuges das in Bild 19a dargestellte Modell, welches vorn zwei Räder und hinten ein Rad aufweist.

*Bild 19: Modelle des Leichtbaufahrzeuges eLTec FCX*

a)



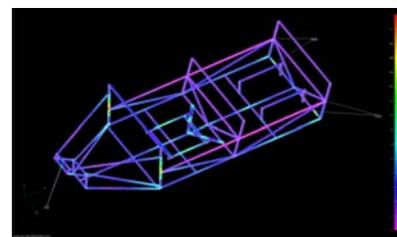
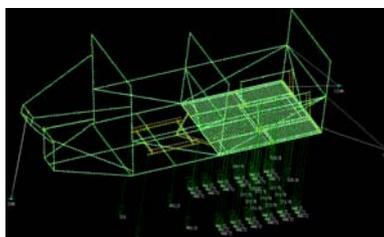
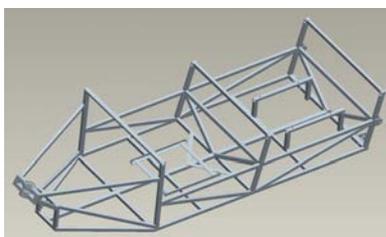
b)



c)



Weitere Überlegungen führen dazu, dass eine gelenkte und gefederte Vorderachse mit zwei Rädern konstruktiv sehr aufwändig und damit das Gewicht der Konstruktion sehr hoch werden würde. Damit fällt die Entscheidung für den in Bild 19b gezeigten 2. Entwurf des Fahrzeuges, das vorn ein Rad und hinten zwei Räder besitzt. Das zu entwickelnde Fahrzeug soll Platz für zwei Erwachsene bieten und über einen Hinterradantrieb verfügen. Dies führt dazu, dass die beiden Sitzplätze hintereinander angeordnet werden, um damit die Anströmfläche, welche u. a. für den Luftwiderstand verantwortlich ist, zu minimieren. Andererseits kann dadurch die Breite und damit auch die Spurbreite des Fahrzeuges gering gehalten werden, was zur Folge hat, dass auf ein Differential für die beiden angetriebenen Hinterräder verzichtet werden kann. Auch dies spielt unter dem Aspekt des Leichtbaus eine wichtige Rolle, da die Realisierung eines mechanischen Differentials zu einem höheren Gewicht führt. Das unter diesen Gesichtspunkten entworfene 3. Modell ist in Bild 19c zu sehen. Es dient nun als Ausgangsmodell für das zu realisierende Fahrzeug, bei dem zunächst wieder umfangreiche FEM-Berechnungen und Optimierungen des Gitterrohrrahmens durchgeführt werden müssen. In Bild 20 ist das CAD- und das FEM-Modell des Rahmens dargestellt. Im FEM-Modell ist zusätzlich die Bodengruppe im hinteren Teil des Fahrzeuges berücksichtigt, um die Belastung, die durch die vier Blei-Gel-Akkus hervorgerufen wird, in den Rahmen einleiten zu können.

*Bild 20: CAD- und FEM-Modell des Leichtbaufahrzeuges eLTec FCX*

Der Rahmen besteht aus DIN-Stahlprofilen, die leicht beschaffbar und verarbeitbar sind. Die Hinterachse wird als Verbundlenkerachse ausgeführt. Für den Antrieb werden zwei Radnabenmotoren mit einer Leistung von 4 kW ausgewählt, auf ein Getriebe kann somit verzichtet werden. Damit kann der 1. Prototyp des eLTec FCX, der in Bild 21 bei ersten Fahrttests zu sehen ist, realisiert werden.

*Bild 21: Das Leichtbaufahrzeug „eLTeC FCX“ – ein Elektro-Fahrzeug für die Stadt*



Ein Teil der sich anschließenden Leichtbaumaßnahmen ist in Bild 22 zu sehen. Das Lenkrad ist eine speziell angefertigte CFK-Konstruktion. Die U-Form zeichnet sich durch ein extrem niedriges Gewicht, durch sehr gutes Handling und aufgrund der integrierten Instrumentierung durch einen hohen Komfort aus. Ähnlich wie beim Lenkrad wird auch bei der Pedalerie Leichtbau und Komfort sinnvoll verbunden. Die Pedalerie besteht aus dem linken Bremspedal für die hinteren Trommelbremsen und die vordere hydraulische Bremse und dem rechten „Gaspedal“. Beide Pedale werden aus Festigkeitsgründen aus Edelstahl gefertigt, wobei die Pedalplatten zur Gewichtsersparnis gelocht sind. Das „Gaspedal“ betätigt ein Zahnradgetriebe, um mit der passenden Übersetzung ein Potentiometer anzusteuern. Der Vorderbau und die Lenkung sind ebenfalls belastungsgerecht konstruiert und kinematisch optimiert. Die abgeknickte Lenksäule stellt dabei auch ein Sicherheitsmerkmal für den Frontalaufprall dar.

*Bild 22: Konstruktive Leichtbaumaßnahmen am eLTeC FCX*



Die Karosserie besteht aus extrem leichten Kunststoffplatten. An kritischen Stellen verstärken Stahlhalterungen und Holzinlets die Kunststoffplatten, um ein Ausknicken zu verhindern. In die Karosserie integriert sind aus Komfort- und Sicherheitsgründen die Beleuchtung einschließlich Blinker, Warnblinker und Lichthupe, Rückspiegel, Hupe und Tachometer. Zur Stromverbrauchs- und Spannungskontrolle dienen die in die Armaturentafel integrierten vier Digitaldisplays. Zwei zeigen den aktuellen Stromverbrauch der beiden Radnabenmotoren an, die beiden anderen dienen der Überwachung des 12 V-Bordnetzes und der 48 V-Spannungsversorgung der Motoren. Zur Komfortsteigerung ist zur zentralen Inbetriebnahme des Fahrzeuges ein Zündschloss mit Schlüsselbetätigung, ein Radio mit SD-Karte und ein Ladegerät, mit dessen Hilfe an jeder handelsüblichen 220 V-Steckdose die Batterien des Fahrzeuges geladen werden können, integriert.

Zukünftige Arbeiten am eLTeC FCX liegen in der Integration einer Brennstoffzelle zwischen den beiden Hinterrädern als Range Extender und in der Entwicklung einer

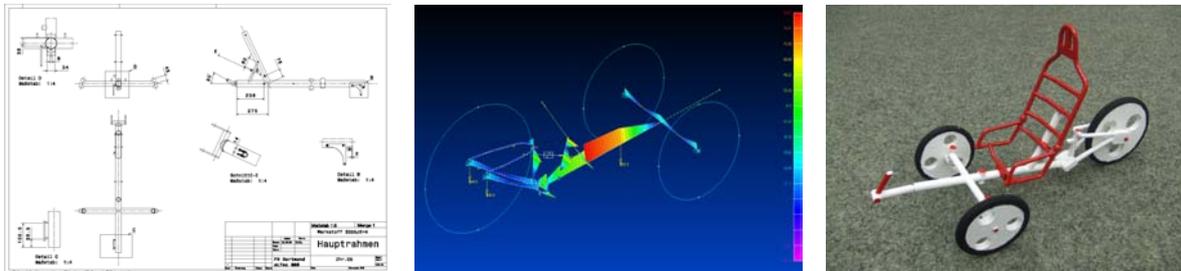
vollständigen Karosserie aus einem Stahlgitterrohrrahmen mit GFK-Verkleidungen, Bild 23.

*Bild 23: Zukünftige Entwicklungen am „eLTeC FCX“: Brennstoffzelle als Range Extender und GFK-Karosserie*



Die aktuellste Entwicklung des Leichtbau-Technologie-Centers der FH Dortmund heißt eLTeC BBS und wird in Kooperation mit der BBS Wilhelmshaven durchgeführt. Ziel ist es, aus den bisher entwickelten Fahrzeugen eLTeC MP und eLTeC OV ein für eine Serienherstellung taugliches Liegedreirad zu entwickeln, welches als Antriebsunterstützung mit einem Elektro-Hilfsmotor ausgerüstet ist. Erste Entwicklungsergebnisse dieser Zusammenarbeit sind in Bild 24 zu sehen. Auch hier spielen CAD, FEM und Rapid Prototyping für die Leichtbaukonstruktion eine entscheidende Rolle.

*Bild 24: „eLTeC BBS“ - gemeinsame Entwicklung der FH Dortmund und der BBS Wilhelmshaven*



## **Veröffentlichungen des Autors zum Thema**

- Die Lösung des Scheibenproblems mit Hilfe eines indirekten Integralgleichungsverfahrens, TU Berlin, ILR-Mitteilung 130, 1984
- Berechnung des Risswachstums in Blechen unter Zug, Biegung und Temperatur, DGLR-Jahrbuch, 1990, 483-492
- Zur Berechnung des Rissausbreitungsverhaltens in Scheiben und Platten mit Hilfe eines gemischten finiten Verfahrens, VDI-Fortschritt - Bericht, Reihe 18, Nr. 96, 1991
- Konstruktionsanalyse mit FEM: Kleine Elemente mit großer Wirkung, AUTOCAD-Magazin, 1/95, 16-20
- Rechnergestützte Optimierung von Bauteilen der Fahrzeugtechnik und des Bauwesens mit Hilfe der FEM, effét 2000, FH Dortmund, 1999
- Leichtbau durch Gewichtsoptimierung mit der Finite-Elemente-Methode, MSC-Technologie-Konferenz, 2000
- Optimierung der Auslegung von Rohrleitungsbauteilen, MSC-Anwendertag, 2001
- Einfluss verschiedener Parameter auf das Optimierungsergebnis einer Topologieoptimierung, 1. Altair Technology Seminar, 2001
- Untersuchung der praktischen Anwendbarkeit von Optimierungsverfahren auf Bauteile des Maschinenbaus und der Fahrzeugtechnik, Forschungsbericht der FH Dortmund, 2002
- Bauteiloptimierung mit FEM und CAD - Von der Idee zum Produkt, Gießerei, 6/2003
- Von der virtuellen Produktentwicklung zum realen Prototypen am Beispiel des Leichtbaufahrzeuges "eLTec MP", Virtual Product Development Conference, 2003
- Von der virtuellen Produktentwicklung zum realen Prototypen am Beispiel des Leichtbaufahrzeuges "eLTec MP", Euromold, 2003
- Leichtbau durch Strukturoptimierung mit FEM und CAD, Berufsakademie Berlin, 2004
- Bauteiloptimierung mit Hilfe der FEM - Möglichkeiten, Anwendungen und Grenzen, Congress Intelligente Leichtbau Systeme, 2004
- Konstruktive Umsetzung der mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode optimierten Designvarianten in fertigungsgerechte Bauteile, Forschungsbericht der FH Dortmund, 2005
- Konstruktion, Berechnung und Bau eines Leichtbaufahrzeuges mit Hilfe computergestützter Methoden (CAD, FEM, MKS), Forschungsbericht der FH Dortmund, 2005
- Das Finite-Elemente-System „OPIUM“, Dortmund, 2008
- Das Cityfahrzeug mit Elektromotor „eLTec MP“, Dortmund, 2008
- Das Leichtbaufahrzeug aus Aluminium „eLTec OV“, Dortmund, 2008
- Das Elektro-Cityfahrzeug „eLTec FCX“, Dortmund, 2008
- Entwicklung eines Fahrzeuges mit Brennstoffzellenantrieb unter besonderer Berücksichtigung des Leichtbaus, Forschungsbericht der FH Dortmund, 2008

## **Keywords**

Leichtbau, Fahrzeugtechnik, Finite-Elemente-Methode, Parameteroptimierung, Formoptimierung, Topologieoptimierung, Liegerad, Elektrofahrzeug

## **Angaben zum Autor**

Fischer, Wilfried, Prof. Dr.-Ing., Fachbereich Maschinenbau der Fachhochschule Dortmund