

Das BMBF-Projekt ELAnO: Entwicklung und Konstruktion von innovativen Leichtbauprodukten unter konsequenter Verwendung adaptierter Analyse- und Optimierungsmethoden

Pascal Häußler, Lukas Nowicki

Universität Karlsruhe (TH)

Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau (mkl), Karlsruhe

Claudia Bangert, Jürgen Sauter

FE-DESIGN GmbH, Karlsruhe

Kurzfassung

Leichtbau heißt Reduktion des Gewichts einer Komponente oder eines Systems auf ein Minimum unter Berücksichtigung aller einwirkenden Lasten und einer Vielzahl von weiteren mechanischen, fertigungsbedingten und ökonomischen Randbedingungen. Bei klassischen, bisher nicht als „Leichtbauprodukte“ betrachteten, Maschinenelementen sind große Potentiale vorhanden, Haltbarkeit zu sichern, Steifigkeit zu steigern und durch Massenreduktion bewegter Einheiten die dynamischen Eigenschaften positiv zu beeinflussen. Ein möglichst früher Einsatz modernster innovativer Analyse- und Optimierungswerkzeuge im Entwicklungszyklus ist erstrebenswert, um dieses Potential auszuschöpfen. Ziel des ELAnO-Projektes war deshalb, ausgehend von der konkreten Problemstellung der Entwicklung und Konstruktion von verschiedenen Leichtbauprodukten mit dem Einsatz numerischer Methoden und der interdisziplinären Strukturoptimierung eine durchgängige Prozesskette zur Entwicklung leichter, steifer, haltbarer und trotzdem wirtschaftlich herstellbarer Produkte zu realisieren. Der Verlauf und Resultate des Projektes werden im Folgenden zusammenfassend vorgestellt. Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkonzeptes „Forschung für die Produktion von morgen“ (Förderkennzeichen 02PP242x) gefördert und vom Projektträger des BMBF für Produktion und Fertigungstechnologien, Forschungszentrum Karlsruhe betreut.

1 Einleitung

Leichtbauprodukte sind oftmals kritisch bezüglich ihrer Herstellkosten. Weil die Kostenfestlegung für die Produkte zum größten Teil in der Entwicklungsphase erfolgt, ist es besonders wichtig, in einem möglichst frühen Stadium modernste innovative Werkzeuge einzusetzen, die speziell an die Erfordernisse und Probleme des Leichtbaus angepasst sind und die eine möglichst exakte Vorhersage des Verhaltens des physikalischen Bauteils erlauben. Bei klassischen Maschinenelementen, die bislang nicht unter dem Aspekt des Leichtbaus betrachtet wurden, sind große Potentiale vorhanden, Haltbarkeit zu sichern, Steifigkeit zu steigern und durch Massenreduktion bewegter Einheiten die dynamischen Eigenschaften positiv zu beeinflussen.

Neue Formen und neue Materialien bestimmen das Design neuer Leichtbauprodukte. Neue Materialien erfordern genaue Ansätze der physikalischen Materialbeschreibung. Lineare Ansätze sind oft nicht mehr ausreichend und müssen durch realitätsnahe nichtlineare Analyseansätze ersetzt werden. Die verantwortungsbewusste Auslegung verlangt das Einbeziehen von Lebensdauerbetrachtungen. Dies bedingt eine exakte Beschreibung der statischen und sich zeitlich verändernden Rand- und Lastbedingungen. Der Produktentwickler kann sich nicht mehr ausschließlich auf seine Konstruktionserfahrung verlassen. Die Vielfalt an Einflussgrößen und die stetig wachsende

Komplexität bedingt durch steigende Anforderungen machen moderne Simulationsmethoden notwendig, die durchgängig in den Entwicklungsprozess integriert sind. Diese Methoden der virtuellen Produktentwicklung erlangen so zunehmend eine Schlüsselrolle.

2 ELAnO

2.1 Ziel und Struktur

Ziel des Projektes ELAnO war es, ausgehend von der konkreten Problemstellung der Entwicklung und Konstruktion von verschiedenen Leichtbauprodukten mit dem Einsatz numerischer Methoden und der interdisziplinären Strukturoptimierung eine durchgängige Prozesskette zur Entwicklung leichter, steifer, haltbarer und trotzdem wirtschaftlich herstellbarer Produkte zu realisieren.

Zur erfolgreichen Durchführung sind entlang der Prozesskette umfassendes Know-how in den Bereichen Produktentwicklung, Fertigung und Herstellung, Materialbeschreibung, Versuch, numerischer Methodeneinsatz, softwaretechnische Umsetzung und Methodeneinführung erforderlich. Diese Voraussetzungen konnten erfüllt werden, weil neben dem gezielt ausgewählten Projekt-Konsortium mit den Produzenten von Leichtbauprodukten, Methodenentwicklern und Softwarefirmen sowie den Forschungsinstituten, ein zusätzlicher industrieller „Verbundprojektberaterkreis“ ins Leben gerufen wurde.



Abbildung 1: ELAnO, Verbundprojektberaterkreis und Industriearbeitskreis „Strukturoptimierung“

Die Erfahrungen und Erkenntnisse des Forschungsvorhabens wurden und werden durch Publikationen wie diese, durch Weiterbildungsmaßnahmen, durch den „Industriearbeitskreis Strukturoptimierung“ sowie die Softwarefirmen und die Universitäten verbreitet, so dass die Ergebnisse allen interessierten Firmen auch über den Rahmen der Projektlaufzeit hinaus zugänglich sind.

2.2 Partner

INDEX-Gruppe	Die INDEX-Gruppe ist ein großer Werkzeugmaschinenhersteller. Dort werden neue Konzepte für innovative Dreh-Fräs-Bearbeitungszentren entwickelt und umgesetzt.
ZF Friedrichshafen AG	Die ZF Friedrichshafen AG entwickelt und fertigt Getriebe, Lenkungen, Achsen und Fahrwerkkomponenten sowie komplette Systeme für Fahrzeuge aller Art.
Freudenberg Forschungsdienste	Bei den Freudenberg Forschungsdiensten werden die in der Unternehmensgruppe entwickelten Gummi-Metall-Bauteile (z.B. für Schwingungstechnik) berechnet und optimiert.
TRW Automotive	Bei TRW Automotive werden komplette Bremssysteme (Bremskraftverstärker, Radbremsen, ABS) und Fahrwerkmodule für alle führenden Automobilhersteller entwickelt.
FE-DESIGN	FE-DESIGN ist Dienstleister im Bereich der numerischen Simulation und entwickelt Software zur Strukturoptimierung.
LMS International	LMS bietet Software, Hardware und Dienstleistungen zur Unterstützung von Virtual, Hybrid und Physical Prototyping in den

	Bereichen NVH, Akustik, Betriebsfestigkeit und Mehrkörpersimulation an.
Mkl / wbk	Die Institute mkl und wbk der Universität Karlsruhe(TH) beschäftigen sich mit der Entwicklung und dem Einsatz von Optimierungsstrategien im Kraftfahrzeug- und Werkzeugmaschinenbau.
Lehrstuhl für Statik, TUM	Der Lehrstuhl für Statik an der TU München beschäftigt sich mit Leichtbaukonstruktionen und der Entwicklung von mathematischen Verfahren zur Strukturoptimierung.

Tabelle 1: ELAnO Projekt-Konsortium

3 Produkte in ELAnO

Um den Erfolg innovativer Produkte nicht zu gefährden, darf aber durch diese zusätzlichen Anforderungen die wirtschaftliche Fertigung nicht aus dem Auge verloren werden. Jeder Anwender im Projekt wird deswegen Produkte bzw. Komponenten konstruieren, die mindestens 20% leichter sind als bisher, sich wirtschaftlich fertigen lassen und weitere mechanische Randbedingungen wie z.B. dynamische Steifigkeit oder Lebensdauer ausreichend berücksichtigen. Jeder beteiligte Produktentwickler hat hierzu einige typische Bauteile spezifiziert, u. a. werden Elastomer-Tragkörper, Motorhalter, Getriebebauteile, eine Telehandlerachse, ein Werkzeugschlitten, eine Spindelpinole, eine Komplett-Bremse, ein Bremsgehäuse und ein Bremsträger einer Strukturoptimierung unterzogen.



Abbildung 2: Projektpartner und Ihre Leichtbauprodukte

4 Methoden und Prozesse

Entsprechend der neuen Anforderungen an die Simulationenmethoden wurden im Verlauf des Projektes neue Ansätze im Bereich der Strukturoptimierung und Bauteil-/Systemsimulation entwickelt und in Softwaretools umgesetzt. Der Fokus der Forschungsarbeiten lag dabei entsprechend der Anforderungen aus dem Konsortium auf folgenden Themengebieten:

- **Berücksichtigung der fertigungsrelevanten Randbedingungen in der Optimierung**

Die Einbeziehung von Fertigungsrandbedingungen in die Konzeption ist ein Querschnittsthema, das sich in nahezu allen Anwendungsbereichen wieder findet. Für ein Bauteil erfolgt bereits in der frühen Konzeptphase die Festlegung des späteren Fertigungsprozesses. Dieser Herstellprozess muss sowohl während der Gestaltstudie unter Einsatz der Topologieoptimierung als auch der Detaillierung mit Hilfe der Formoptimierung berücksichtigt werden.

Im Bereich der Topologieoptimierung wurden Algorithmen zur Einhaltung der Gussrestriktionen entwickelt [1,2]. Durch die Vorgabe einer Auszugsrichtung werden

Materialhinterschnitte oder Hohlräume am optimierten Bauteil vermieden. Der Anwender hat die Möglichkeit Teilungsebenen selbst zu definieren oder die Wahl der Ebene dem Softwaretool zu überlassen. Die Gefahr einer Materialanhäufung, die beim Gießverfahren zur Porenbildung führt, wird durch die Vorgabe einer maximalen Strebendicke verhindert. Zu dünne Strukturen, die verfahrenstechnisch nicht herstellbar sind, werden durch die Einhaltung einer Mindeststärke beseitigt.

In der Formoptimierung wurde ein neues Verfahren entwickelt, das eine vom Finiten Elemente Netz unabhängige Einhaltung der fertigungsbedingten Restriktionen ermöglicht. Durch die geometriebasierte Kopplung der Designknoten wird der Modellierungsaufwand sowie die Anforderungen an die Vernetzung der Bauteile deutlich reduziert. Dieser Ansatz ermöglicht die Berücksichtigung der Trennprozesse, wie z. B. Stanzen, Drehen oder Bohren sowie der Urformprozesse, im speziellen die Entformbarkeit beim Gießen während der Optimierung.

- **Entwicklung neuer robuster Optimierungsalgorithmen zur effizienten Designfindung**

Die Akzeptanz der Methoden der Strukturoptimierung kann deutlich erhöht werden, wenn die Strukturoptimierung um wesentliche Funktionen erweitert wird und gleichzeitig die Robustheit und Einfachheit in der Anwendung gegeben ist. Aus der Kooperation der Projektpartner ergaben sich im Vorfeld des Projektes spezielle Anforderungen an die Optimierungsverfahren. Eine wichtige Aufgabe lag in der Entwicklung eines robusten Algorithmus für große Probleme mit vielen Variablen und Nebenbedingungen sowie nichtlinearem Tragwerkverhalten.

Der Lehrstuhl für Statik der Technischen Universität München verfügt über umfangreiche Erfahrung im Bereich der Strukturoptimierung allgemein und in der Entwicklung von Optimierungsverfahren im Speziellen. Aufbauend auf dem Verfahren der „Method of Moving Asymptotes“ wurde im Rahmen von ELAnO ein duales, mathematisches Approximations- und Optimierungsverfahren DEMMA (Dual Extended Method of Moving Asymptotes) entwickelt.

Die ersten akademischen Beispiele im Bereich der Topologie- und Formoptimierung belegen die Stärken des neuen Verfahrens. Insbesondere sehr große Modelle mit vielen Nebenbedingungen und vielen Entwurfsvariablen werden durch die eingesetzten Entkopplungstechniken besonders effizient gelöst.

- **Strukturoptimierung auf Basis nichtlinearer FEM-Analysen**

Als eine der wichtigsten Anforderungen an die Optimierungsmethoden war die Berücksichtigung von Nichtlinearitäten in der Optimierung. Hierzu gehören geometrische Nichtlinearitäten (große Deformationen), nichtlineares Materialverhalten (Hyperelastizität) sowie nichtlineare Randbedingungen (Kontaktbedingungen). Der Fokus der Untersuchungen lag in der Anpassung der Optimierungsalgorithmen an die Anforderungen der nichtlinearen Problemstellungen sowie Kopplung der Optimierungssoftware mit den nichtlinearen FE-Solvern HKS/ABAQUS und MSC.Marc. Diese neuen Methoden [3] wurden im Verlauf des Projektes an Elastomerbauteilen erfolgreich validiert und eingesetzt.

- **Methodenverzahnung, Einbindung in den Entwicklungsprozess**

Neben der Entwicklung neuer Simulationsmethoden stand ihre Integration in durchgängige virtuelle Entwicklungsprozesse im Vordergrund. Alle Simulations- und Optimierungsmethoden wie z. B. Finite Elemente Methode, Mehrkörpersysteme, Lebensdaueranalyse, Topologie- und Formoptimierung lassen sich modular in vielen Arbeitsprozessen einsetzen. Welche Methoden tatsächlich in der Praxis angewendet werden, hängt sehr stark von der Vorgehensweise im jeweiligen Produktentwicklungsprozess und den Anforderungen an das Produkt ab. Im Rahmen von ELAnO galt es deshalb, exemplarisch an realen Beispielen die Durchgängigkeit der virtuellen Entwicklungsprozesse aufzuzeigen und in einzelnen Bereichen zu verbessern. So zum Beispiel wurde am Institut für

Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der Universität Karlsruhe durch die Kopplung von Mehrkörperdynamik, der Festigkeitsanalyse und der Lebensdaueranalyse mit der Formoptimierung ein Prozess zur Gestaltung und Auslegung hochdynamisch beanspruchter Bauteile [4] entwickelt. Durch die Einbeziehung der Lebensdaueranalyse in die Designfindung konnte hier der Einfluss des Werkstoffverhaltens und der zeitabhängigen Lastkollektive auf die Gestaltung des Bauteils berücksichtigt werden. Die notwendigen Last-/Zeitreihen wurden mit Hilfe der Mehrkörperanalyse generiert. Als Zielfunktion des Optimierungsmodells wurde hier, anders als bei der Optimierung von quasistatisch beanspruchten Bauteilen, die Minimierung der Schädigung definiert.

5 Ergebnisse und Erfahrungen: Methodeneinsatz in der Produktentwicklung

5.1 Neukonstruktion einer Radbremse

Für viele Fahrzeuge werden heute immer höhere Anforderungen an die Bremssysteme gestellt. Neben der hohen Bremsleistung werden ein möglichst niedriges Gewicht und sehr gute Komfoteigenschaften in Hinblick auf die Geräusentwicklung angestrebt. TRW Automotive führte



Abbildung 3:
Prototyp einer neuen Radbremse

in Rahmen des Projektes unter konsequentem Einsatz der Simulations- und Optimierungsmethoden eine Neukonstruktion einer Radbremse [5] durch. In der 3-jährigen Entwicklungszeit wurden zunächst verschiedene Konzeptvarianten berechnet zwecks erster Aussagen über die Qualität der Lösungsvorschläge. Anschließend wurden die besten Varianten entsprechend der Zielvorgaben hinsichtlich ihrer Topologie optimiert. Erst im Anschluss an den abgeschlossenen virtuellen Entwicklungsprozess wurden die Designvorschläge auskonstruiert und ein Prototyp der Bremse angefertigt.

Diese Vorgehensweise ermöglichte eine Reduktion der Iterationsschleifen in der Validierungsphase. Bereits die erste Prototypengeneration erfüllte nahezu alle geforderten Ziele. Dadurch konnten die Fertigungskosten für weitere Prototypen eingespart und die Entwicklungszeit um ca. 20% reduziert werden.

5.2 Entwicklung einer Telehandlerachse

Am Beispiel einer Telehandlerachse konnte die ZF Friedrichshafen AG das Potential der in den Produktentwicklungsprozess integrierten CAE-Methoden aufzeigen. Zielsetzung der Entwicklung war eine Gewichts- und Beanspruchungsreduktion der Neukonstruktion gegenüber dem Vorgängermodell. Der durchgängige Entwicklungsprozess beinhaltete den Einsatz der Kinematiksimulation zur Bestimmung des zur Verfügung stehenden Bauraums, der Topologieoptimierung unter Berücksichtigung der nichtlinearen Randbedingungen sowie Einhaltung der Fertigungsrestriktionen und zuletzt grundsätzlicher Überlegungen zur Optimierung des Gießprozesses zur optimalen Festlegung des Angussystems. Mit Hilfe dieser Verfahren konnten sowohl das Gewicht als auch die mechanische Beanspruchung der einzelnen Bauteile deutlich reduziert werden.

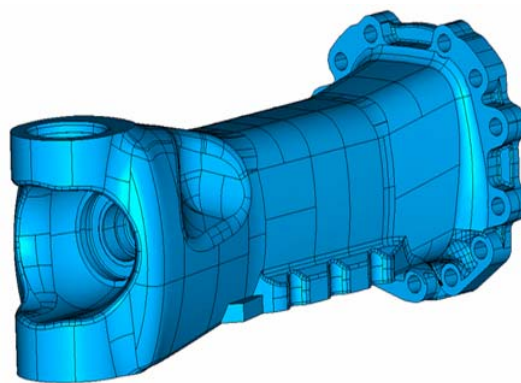


Abbildung 4:
Achsbrücke Telehandlerachse

5.3 Topologie- und Formoptimierung von Elastomerbauteilen



Abbildung 5:
Prototyp eines Nockenwellentilgers

Bei der Entwicklung eines Nockenwellentilgers [6,7] der Firma Freudenberg Forschungsdienste KG stand eine gezielte Einstellbarkeit der mechanischen Eigenschaften im Vordergrund. Ausgehend von einem Referenzbauteil konnten durch die Kopplung der Topologieoptimierung mit einem Parameteroptimierer unter dem Einsatz statistischer Versuchsplanung alle Steifigkeitsanforderungen an das Bauteil erfüllt werden. Ziel der anschließenden Formoptimierung des Querschnitts und der Montageöffnungen war eine Erhöhung der Betriebslebensdauer.

Durch die Anwendung der Optimierungsmethoden konnte auf zusätzliche Iterationsschleifen in der Validierung verzichtet werden. Bereits die erste Prototypengeneration zeigte im Versuch sehr gute Lebensdauerergebnisse und wurde direkt in die Serie freigegeben. Der gesamte Entwicklungsprozess, inklusive der Prototypenherstellung und der Experimente, konnte innerhalb von 4 Wochen abgeschlossen werden.

5.4 Optimierung eines Werkzeugmaschinen Schlittens

INDEX Werke GmbH & Co. KG Hahn & Tessky ist ein mittelständischer Hersteller von Werkzeugmaschinen. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Produktionstechnik der Universität Karlsruhe wurden im Rahmen von ELAnO Komponenten eines Dreh-Fräszentrums neu konstruiert. Entsprechend der Forderung nach einer Mindeststeifigkeit der Bauteile bei gleichzeitiger Gewichtsreduktion wurde zunächst eine Gestaltungsstudie basiert auf der Topologieoptimierung durchgeführt. Anschließende FEM-Analysen ermöglichten den Vergleich der Qualität der einzelnen Varianten. Die letztendlich konstruktiv umgesetzte Lösung wurde einer Verifikationsrechnung und Robustheitsanalyse unterzogen. Die Validierung der gesamten Maschine erfolgte sowohl virtuell (FEM) als auch experimentell. Die Ergebnisse beider Untersuchungen zeigen, dass das gewünschte dynamische Verhalten des Systems erreicht wurde. Gleichzeitig konnte das Gewicht der Maschine um ca. 15% reduziert werden, was mit einer Einsparung der Materialkosten verbunden ist. Durch die Anwendung der Simulationsmethoden konnte die Entwicklungszeit verkürzt und der Qualitätsaufwand (Nacharbeitung) verringert werden.



Abbildung 6:
Versuchsträger
Gegenspindelschlitten

6 Zusammenfassung und Ausblick

Drei Jahre intensive Zusammenarbeit der Partner in ELAnO haben zu einer Vielzahl an Ergebnissen geführt. Zahlreiche neue Simulationsmethoden und -Prozesse konnten erarbeitet werden im direkten Kontext der Entwicklung von Leichtbauprodukten. Die enge Verknüpfung von Anwendung und Methoden- und Softwareentwicklung erwies sich als besonders effizient und zielführend. Mehrere völlig neue Simulationsprozesse, wie zum Beispiel die Optimierung auf Lebensdauer unter Einbezug der Mehrkörpersimulation, sowie eine Vielzahl neuer Features und Möglichkeiten bei den Tools der beteiligten Softwarehersteller belegen die erfolgreiche Arbeit durch Synergieeffekte in dieser Konstellation. Die Ergebnisse der Anwender, verbesserte und neu entwickelte Produkte, demonstrieren das Potential innovativer numerischer Verfahren im Hinblick auf effizienten Leichtbau. In allen betrachteten Beispielen konnte das definierte Ziel, eine Reduktion von Gewicht und Kosten, erreicht werden. Bei TRW und der Freudenberg Forschungsdienste KG konnten bereits mit dem ersten realen Prototyp alle Tests erfolgreich absolviert werden. Diese Verringerung der Prototypengeneration durch den Einsatz von modernen Simulations- und Optimierungsmethoden liefert einen entscheidenden Beitrag zur Reduktion von Entwicklungszeit und Kosten. Darüber hinaus konnten

durch diese neuartigen Methoden Bauteile derart grundlegend verbessert oder sogar völlig neu entwickelt werden, dass sich aus den Projektergebnissen heraus Patentanmeldungen ergaben.

Ein weiteres Ergebnis sind die vielen gesammelten und ausgetauschten Erfahrungen sowohl der Anwender im Bezug auf ihren eigenen Entwicklungsprozess, als auch der Entwickler und Forschungsinstitute im Bereich der Grundlagen und Methoden. Dies führte nicht zuletzt dazu, dass einige der neuen Verfahren oder Prozesse bei Anwendern bereits fest in den Standardentwicklungsprozess integriert wurden. Eine Vielzahl an Veröffentlichungen und Vorträgen sowie zahlreiche weitere Artikel und Informationen, die in einem ELAnO-Informationssystem zusammengetragen wurden, stehen dritten auch über die Laufzeit von ELAnO hinaus zur Verfügung und tragen so zu einer nachhaltigen Verwertung dieser Ergebnisse in einem größeren Rahmen bei. Die geplante, weiterführende Zusammenarbeit zwischen einzelnen ELAnO Partnern ist ein direkter Beleg für die erfolgreichen Aktivitäten in den letzten drei Jahren und trägt ebenfalls zur weiteren Verwertung und Nutzung von ELAnO Ergebnissen bei.

Literatur

- [1] P. Allinger, J. Noack: „Topology Optimization of Industrial Problems with Manufacturing Restrictions“, Topology Optimization Days, Thurnau, 2003
- [2] J. Sauter, B. Lauber: „Integrierte Gestalt- und Topologieoptimierung im Konstruktionsprozess“, Simulation - Das Fachmagazin für FEM, CFD und MKS, Ausgabe 1/2002
- [3] M. Friedrich, R. Meske, J. Sauter: „Optimierung von Gummi-Metallbauteilen mit TOSCA und ABAQUS“, ABAQUS Anwendertreffen, 24.-25. September 2001, Freiburg.
- [4] P. Häußler: „Gestaltoptimierung von dynamisch beanspruchten Bauteilen auf Betriebsfestigkeit durch Kopplung von Lebensdaueranalyse, MKS; FEM und TOSCA“, Tagung des Arbeitskreises Strukturoptimierung, 17.-18. September 2002, München
- [5] J. Noack: „Topology Optimization with Casting and Machining Restrictions by the Example of Brake Parts“, CAD-FEM Users' Meeting 2003, 12.-14. November 2003, Potsdam
- [6] M. Friedrich, M. Boggasch: „Auslegung eines Nockenwellentilgers mit ABAQUS und TOSCA“, ABAQUS Anwenderkonferenz, 23.-24. September 2002, Wiesbaden
- [7] M. Friedrich, M. Moelle, Ch. Althausse: „Werkzeuge zur Entwicklung von beanspruchungs- und zugleich gussgerechten Konstruktionen“, Konstruktion, Ausgabe 9/2003
- [8] J. Sauter, E. Steinebrunner: „Entwicklung und Konstruktion von innovativen Leichtbauprodukten unter konsequenter Verwendung adaptiver Analyse und Optimierungsmethoden“, simulation - Das Fachmagazin für FEM, CFD und MKS, Ausgabe 2/2003
- [9] J. Noack, H.-C. Bock, B. Lauber: „ELANO - Strukturoptimierung auf Spannungs- und Lebensdauergrößen mit ANSYS“, CADFEM Anwenderkonferenz, 9.-11. Oktober 2002, Friedrichshafen
- [10] R. Meske, J. Sauter, K.-H. Katzoreck, B. Harter: „Entwicklung und Konstruktion von innovativen Leichtbauprodukten durch den Einsatz des Strukturoptimierungssystems TOSCA im IDEAS Umfeld“, SDRC Anwenderkonferenz 2001, 12.-13. November 2001, Rust
- [11] www.elano.org: Offizielle Webseiten des Projektes mit weiteren Veröffentlichungen
- [12] <http://elanoinfo.mkl.uni-karlsruhe.de/elanoport/>: Informationssystem zu ELAnO

