

ANSÄTZE ZUR BESCHLEUNIGUNG DER PRODUKTENTWICKLUNG DURCH INTELLIGENTE VERKNÜPFUNG VON SIMULATIONEN

Alexander Troll, Andreas Dörnhöfer, Jens-Uwe Goering, Frank Rieg

Zusammenfassung

Durch die intelligente Kopplung von Simulationen können gewünschte Eigenschaften eines Bauteils nicht nur verifiziert, sondern auch, durch die Veränderung von Merkmalen, erzeugt werden. Dies soll anhand des Ablaufplans für die Topologieoptimierung eines Gussteils mit dem Ziel der Gewichtsreduktion aufgezeigt werden. Die Herausforderungen, mit denen der Konstrukteur dabei konfrontiert wird, werden dargelegt. Als Ergebnis lässt sich feststellen, dass im Entwurfsprozess durch die Bereitstellung von Handlungsempfehlungen und die Schulung des Konstrukteurs unnötige Iterationen vermieden werden. Eine Beschleunigung des Entwurfsprozesses ist möglich.

Im Rahmen des Projektverbundes FORFLOW der Bayerischen Forschungstiftung sollen diese Handlungsempfehlungen Konstrukteuren zugänglich gemacht werden. Dies soll auch dazu dienen, DfX-Kriterien mithilfe von gekoppelten Simulationen umzusetzen.

1 Intelligente Verknüpfung von Simulationen als Mittel zur Umsetzung von DfX-Kriterien

1.1 Das ICROS-Prinzip zur Beschleunigung des Entwicklungsprozesses

Durch den zunehmend intensiveren Einsatz von computergestützten Simulationen in der Industrie erhält die intelligente Kopplung von Methoden und Werkzeugen einen immer größeren Stellenwert. Die zielgerichtete Verknüpfung der einzelnen Computer Aided Engineering Werkzeuge (CAx) kann unnötige Iterationen im Produktentwicklungsprozess (PEP) vermeiden und somit die Entwicklungszeit verringern. Diese Verknüpfung kann durch konsequente Anwendung von ICROS (Intelligent **C**rosslinked **S**imulations) [1] erreicht werden. Ziel dieses Prinzips ist es, dem Entwickler zur Bewältigung konkreter Simulationsaufgaben Handlungsabläufe zur Verfügung zu stellen, welche in Abhängigkeit von den Randbedingungen der Aufgabe Simulationsabfolgen und Hilfestellungen vorschlagen [2].

1.2 Gezielte Nutzung von Simulationen zur Erzeugung und Verifizierung von Bauteileigenschaften

Eine der Hauptaufgaben in der Produktentwicklung ist die Erzeugung bestimmter Eigenschaften des Endprodukts respektive des einzelnen Bauteils. Beispiele hierfür sind die Belastungs- oder Fertigungsgerechtheit. Der Konstrukteur hat nicht die Möglichkeit, diese Eigenschaften selbst zu beeinflussen, sondern er kann deren Erfüllung nur durch die Merkmale (z. B. die Geometrie) seiner Konstruktion herbeiführen [3]. Im Fall der Fertigungsgerechtheit ist es zweckmäßig, sich der existierenden Simulationswerkzeuge zu bedienen. Fräs-, Umform- und Gießsimulationen bieten die Möglichkeit, frühzeitig in der Entwurfsphase die Fertigbarkeit nachzuweisen. Andere Methoden, wie numerische Optimierungen, werden gezielt eingesetzt, um selbständig Merkmalsausprägungen zu erzeugen, die zu einer gewünschten Eigenschaft führen. Mit Hilfe des ICROS-Prinzips können durch die Kopplung von Simulatio-

nen die Eigenschaften, welche das endgültige Bauteil erfüllen soll, erzeugt (durch Festlegung der Ausprägung von Merkmalen) und auch verifiziert werden. Dieses Konzept soll am Beispiel eines auf geringes Bauteilgewicht optimierten Radträgers unter der Berücksichtigung der Fertigungsgerechtigkeit verdeutlicht werden.

2 Anwendung an einem konkreten Beispiel: Radträger eines Formelrennwagens

2.1 Gewichtsreduktion von Gussbauteilen durch Optimierung

2.1.1 Leichtbau in der Automobilindustrie

Bei modernen Serienfahrzeugen besteht durch die aktuellen Maßnahmen des Gesetzgebers die Notwendigkeit zur Verminderung der CO₂-Emissionen. Neben der ständigen Weiterentwicklung der Verbrennungsmotoren bietet eine konsequente Verringerung des Fahrzeuggewichts hohes Potential für die Verbrauchsreduktion [4]. Im Rahmen der Serienfertigung kann der Leichtbauaspekt nur in begrenztem Umfang zum Einsatz kommen, da hier zur Sicherstellung der Dauerfestigkeit hohe Sicherheiten angesetzt werden. Im Motorsportbereich kann das volle Potential des Leichtbaus ausgeschöpft werden, obwohl auch hier eine belastungsgerechte Konstruktion die Grundvoraussetzung für den sportlichen Erfolg darstellt (*to finish first, you have to finish first*). Diese wird durch eine grenzwertige Auslegung auf genau festgelegte Lastfälle erreicht, mit der das Gewicht der einzelnen Bauteile stark verringert werden kann. Durch die konsequente Reduktion des Leergewichts kann die Fahrdynamik und damit die Schnelligkeit des Rennwagens erhöht werden.

Einer der neuralgischen Punkte eines Fahrzeugs ist das Fahrwerk. Durch eine Verringerung der ungefederten Massen (Radträger, Räder, Aufhängung) kann das Ansprechverhalten der Federung stark verbessert werden [5]. Der Einsatz unterschiedlicher Ansätze für den Leichtbau ist hierbei möglich [6]. Im Rahmen des Stoffleichtbaus wird die Masse des Bauteils durch die Verwendung von Materialien mit geringerer Dichte als der des Ausgangswerkstoffes vermindert. Neben dieser Materialsubstitution gibt es die Möglichkeit des Formleichtbaus [7]. Hier wird die Bauteilgeometrie dem vorliegenden Anwendungsfall und der auftretenden Belastung z. B. durch eine Formoptimierung angepasst. Aktuell werden beide Ansätze miteinander kombiniert, um Synergieeffekte zu erzeugen [8].

2.1.2 Fertigungsgerechtigkeit als Eigenschaft des resultierenden Bauteils

Der betrachtete Radträger wird im Druckgussverfahren hergestellt. Folglich muss er in erster Linie auf diese Herstellungsart ausgelegt werden. Die Fertigungsgerechtigkeit ist in diesem Fall die Eigenschaft, die das Bauteil aufweisen soll; die Merkmale, die hierfür betrachtet werden müssen, sind vor allem die Geometrie und Topologie sowie das Material [9]. Eine geeignete Ausprägung dieser Merkmale wird durch das Umsetzen von Gestaltungsrichtlinien [10] erreicht und die Eigenschaft "gießgerecht" durch den Einsatz einer Gießsimulation und mit nachfolgenden Versuchen verifiziert. Um notwendige Änderungen (nach nicht zufrieden stellenden Simulationsergebnissen) möglichst einfach durchführen zu können, benötigt man geeignete Modellierungsstrategien beim Aufbau des Teils in Computer Aided Design-Werkzeugen (CAD). Dies schließt nicht nur die Strategie zur Erzeugung des Rohteils, also des Produkts des Gießvorgangs, sondern auch nachfolgende Schritte zur Endbearbeitung ein [11].

Im Fall der Topologieoptimierung eines Gussteils muss nicht nur das Bauteil selbst betrachtet werden. Die Fertigbarkeit des Werkzeugs für den Guss ist genauso zu berücksichtigen wie die Notwendigkeit zur Erzeugung eines Frästeils als Prototyp für den Radträger. Somit

müssen im Ablauf des Entwurfsprozesses mehrere Fertigungsgerechtheiten kombiniert werden, was nur durch vorausschauendes Modellieren bewerkstelligt werden kann.

2.2 Handlungsablauf für den Detailentwurf des Bauteils

Der Schritt der Topologieoptimierung darf bei der Entwicklung von Bauteilen unter dem Aspekt des Formleichtbaus nicht nur separiert betrachtet werden. Er ist vielmehr im Hinblick auf die Verkürzung der Produktentwicklungszeiten als Teil einer virtuellen Prozesskette zu sehen. Entlang dieser Prozesskette findet die Entwicklung vom zur Verfügung stehenden Bauraum bis zum gussoptimierten Bauteil statt (Bild 1).

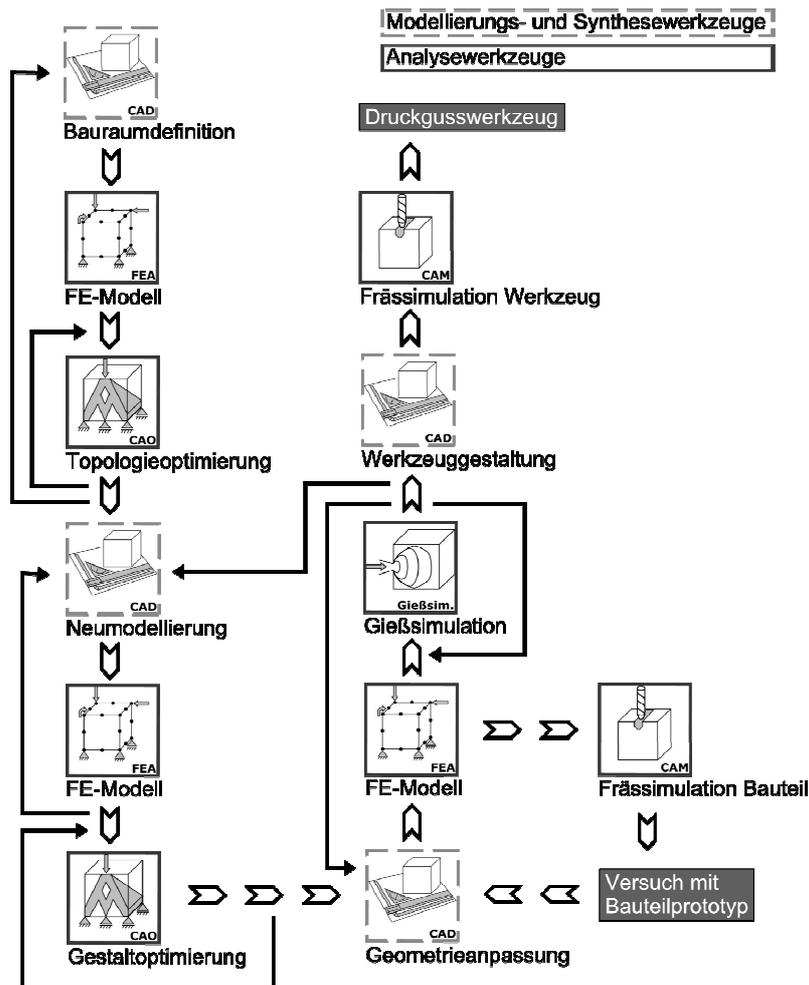


Bild 1: Handlungsempfehlung für die Topologie- und Gestaltoptimierung eines Bauteils.

Neben 3D-CAD-Systemen kommen FE-Software mit Solver, Prä- und Postprozessor, das CAO-Paket (Computer Aided Optimization) mit Topologie- und Gestaltoptimierung, Werkzeuge zur Geometrieanalyse sowie die Gießsimulation zum Einsatz. Ausgangspunkt ist der in einem CAD-System erstellte Bauraum. Dieser wird in einem FE-Programm in ein für die Optimierung geeignetes Modell überführt. Dieses Modell wird von der CAO-Software in mehreren Iterationen entsprechend des festgelegten Optimierungsziels optimiert. Ist das Resultat zufrieden stellend, kann ausgehend davon eine Neumodellierung im CAD-Programm stattfinden.

Falls nicht, muss, je nach Ergebnis der Bewertung, entweder eine Anpassung des FE-Modells (schlechtes Optimierungsergebnis durch falsche Vernetzung oder unzutreffende Wahl

der Randbedingungen) oder des Bauraums (Bauraumeinschränkung oder -erweiterung) erfolgen.

Bei der Neugestaltung nach der Topologieoptimierung müssen bereits Aspekte der Fertigungsgerechtigkeit für Fräs- und Gussteile, z. B. in Form von Ausformschrägen oder Vermeidung von Hinterschneidungen, berücksichtigt werden. Das erzeugte Teil wird zum Nachweis der Bauteilfestigkeit in einer FE-Simulation mit den vorgegebenen Lastfällen, überprüft. Nach einer Gestaltoptimierung und einer etwaigen Anpassung der Geometrie wird zunächst nach erfolgreicher Fräsimulation ein Prototyp als Frästeil gefertigt. Die Erkenntnisse aus den Versuchen mit den Prototypen fließen in das CAD-Teil ein. Sind die Versuchsergebnisse zufrieden stellend, kann die Gießsimulation für das Bauteil erfolgen. Ausgehend davon wird im CAD eine entsprechende Form für den Druckguss erzeugt.

Das nachfolgende Bild 2 zeigt für den Radträger den Weg vom Bauraum im CAD-System über das FE-Modell und die Stadien der Topologieoptimierung bis zur Neukonstruktion. Angeführte Programmpakete sind exemplarisch zu sehen. Bei Rhinoceros handelt es sich um ein Modellierungs-System, das für eine Geometrieanalyse verwendet wird. Als Ergebnis der Optimierung liegt eine Datei im Stereolithographie-Format (STL) vor.

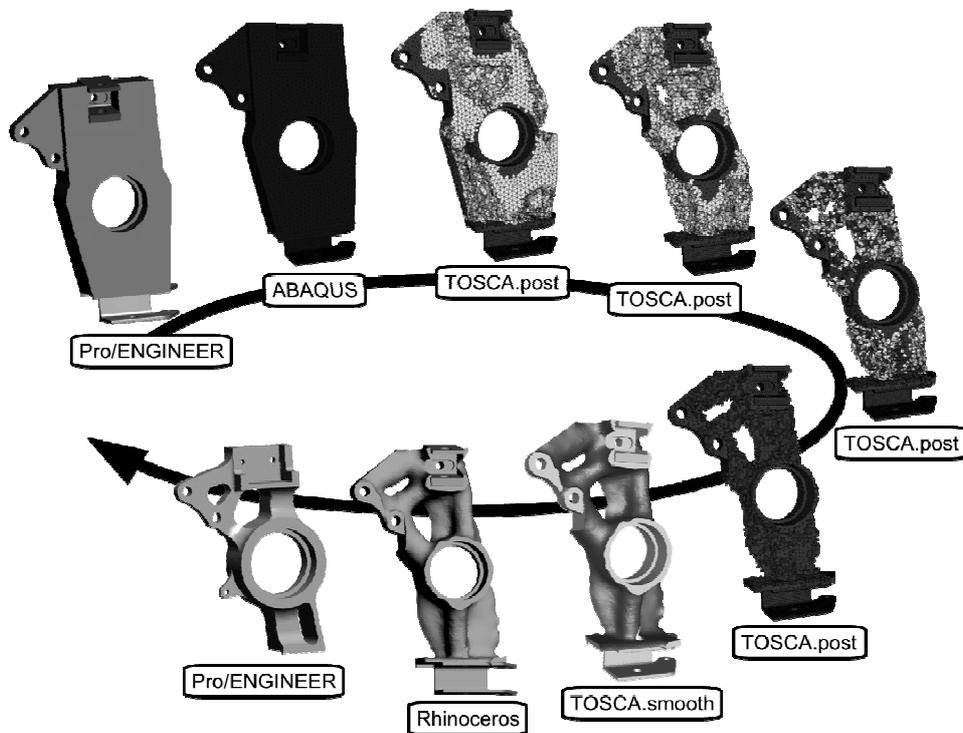


Bild 2: Grafische Darstellung der Prozesskette vom Bauraum zum fertigen Bauteil anhand der Geometriemodelle.

Diese beinhaltet nicht nur das zu optimierende Teil, sondern auch eingefrorene Bereiche wie andere Bauteile, die zur Verbesserung der Abbildungsgenauigkeit des Optimierungsmodells benötigt werden. Da Rhinoceros über die Möglichkeit zum Import von STL-Baugruppen verfügt, können hier die eingefrorenen Bereiche entfernt werden. Weiterhin werden hier das Volumen und die Gesamtoberfläche bestimmt. Das Endvolumen gibt Auskunft über die Einhaltung des Optimierungsziels, die Oberfläche liefert Informationen über die Fertigungsgerechtigkeit des Bauteils. Da es sich um ein Druckgussteil handelt, muss mithilfe der Bauteiloberfläche geklärt werden, ob die Schließkraft der vorhandenen Druckgussanlage ausreichend ist.

2.3 Herausforderungen während des Konstruktionsprozesses

Betrachtet man den in Bild 3 dargestellten Prozessausschnitt genauer, so sieht sich der Entwickler mit verschiedenen Herausforderungen konfrontiert. Im Wesentlichen handelt es sich um die Notwendigkeiten für den Datenaustausch zwischen den verschiedenen CAX-Werkzeugen, den Entwicklungsbruch nach der Optimierung und die Sicherstellung der Fertigbarkeit der Bauteile.

Die Überführung des Bauraums in das FE-Programm erfolgt über das Austauschformat STEP (**S**tandard for the **E**xchange of **P**roduct Model Data). Die eingelesenen Geometriedaten müssen qualitativ für die Vernetzung durch den Präprozessor des FE-Systems geeignet sein. Ist dies nicht der Fall, so muss entweder eine Modifikation im Simulationstool oder im CAD-System erfolgen. Hier ist darauf zu achten, dass die Grenzen des Bauraums nicht verletzt werden. Der Datenaustausch zwischen FEA und Optimierung geschieht ohne Eingriff des Nutzers vollautomatisch. Dabei muss der Entwickler aber genau auf die Anforderungen achten, die das CAO-Tool an das FE-Modell stellt. Die Anforderungen an das Netz sind zum Teil konträr zu den üblichen Best Practices für die FEA.

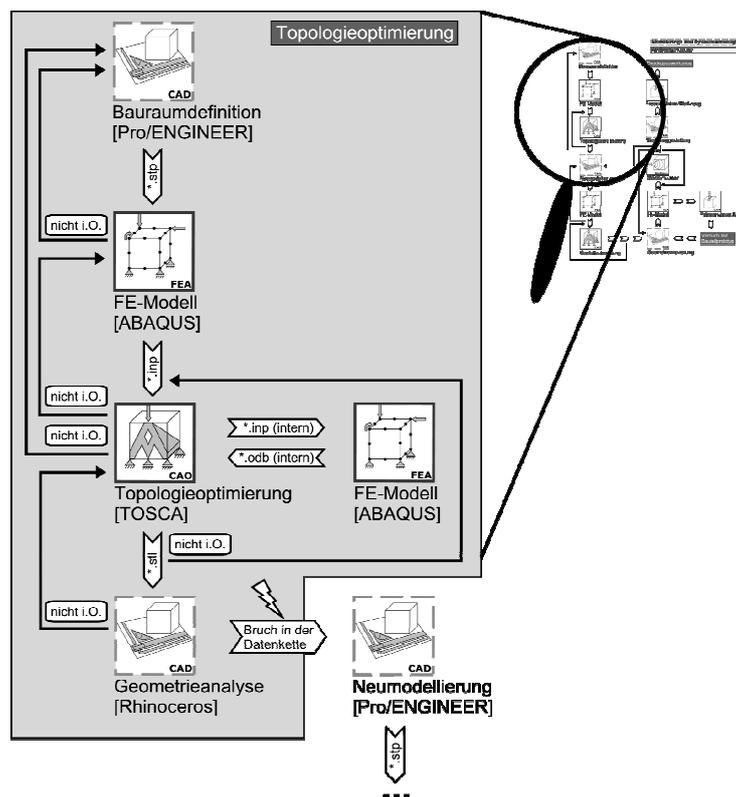


Bild 3: Betrachter Prozessausschnitt, von der Bauraumdefinition bis zur Neumodellierung; Darstellung der Datenaustauschvorgänge.

Da nach der Optimierung nur eine STL-Datei vorliegt, welche nicht direkt in einem CAD-System weiterverarbeitet werden kann, und aufgrund der mangelnden Fertigungseignung des Optimierungsergebnisses kommt es zu einem Entwicklungsbruch. Es muss nach der Geometrieanalyse ein kompletter Neuaufbau des Bauteils durchgeführt werden. Um die Wahrung des Bauraums sicherzustellen, wird das Modell, ausgehend vom Bauraum, durch Materialschnitte und ähnliche Konstruktionselemente erzeugt. Hierbei ist das Wissen des Konstrukteurs nötig, um die Konstruktion fertigungsgerecht zu gestalten.

Es muss sowohl darauf geachtet werden, dass der Prototyp fräsgerecht gestaltet wird, als auch darauf, dass das resultierende Teil gießgerecht ist und das daraus abgeleitete Werkzeug für den Druckguss gefertigt werden kann. Ebenfall müssen Nachbearbeitungen am rohen Gussteil berücksichtigt werden. Diese Kriterien werden durch entsprechende Simulationen und Versuche verifiziert. Bei notwendigen Änderungen muss der Einfluss auf den weiteren Prozessverlauf abgeklärt werden. Somit ist jeder Schritt des Prozesses immer im Gesamtzusammenhang zu sehen.

3 Schlussfolgerungen und Ausblick

Am Beispiel des Leichtbaus durch Optimierung lässt sich zeigen, dass beim Einsatz von modernen CAx-Werkzeugen die einzelnen Schritte nicht abgeschlossen betrachtet werden können. Ohne die vorausschauende Planung für die nachfolgenden Abläufe kann es zu unnötigen Iterationen kommen, die den gesamten Konstruktionsprozess verlangsamen. Um dies zu vermeiden, müssen geeignete Ablaufschemata für relevante Prozesse erstellt werden, welche die intelligente Vernetzung von Simulationen ermöglichen. Im Rahmen dieser Handlungsabläufe kann die Umsetzung und Verifikation von DfX-Kriterien, in diesem Fall der Fertigungsgerechtigkeit, unterstützt werden. Die Umsetzung von DfX kann aber nicht allein durch die CAx-Werkzeuge geschehen. Der Konstrukteur benötigt ausreichendes Wissen darüber, wie er selbst die Gerechtheiten umsetzen kann und in welchem Bezug sie zueinander stehen. Im vorliegenden Fall muss das entstehende Bauteil selbst gussgerecht sein, aber sowohl ein Bauteilprototyp als auch das Werkzeug für den Druckguss des Bauteils werden gefräst.

In künftigen Untersuchungen sollen im Rahmen des Forschungsverbundes FORFLOW weitere Zusammenhänge zwischen DfX-Kriterien und Simulationen untersucht werden. Ziel soll es sein, aus der Vorgabe von DfX-Kriterien mögliche Strategien für deren Umsetzung mit gekoppelten Simulationen abzuleiten. Werden diese Strategien dem Konstrukteur zur Verfügung gestellt, kann der Produktentwicklungsprozess deutlich beschleunigt werden.

4 Literatur

- [1] Alber, B.; Rieg, F.; Hackenschmidt, R.: Bauteilentwicklung mit Hochleistungskunststoffen - Intelligent vernetzte Simulationen mit anschließender Versuchsverifikation. In: 33. Tagung DVM-Arbeitskreis Betriebsfestigkeit, Bd. DVM Berichtsband 133, e.V., D. V. f. M. (Hrsg.). Steyr, Österreich: 2006, S. 13-22.
- [2] Hackenschmidt, R.; Alber, B.; Rieg, F.: Intelligente Verknüpfung von Simulationsprogrammen. In: CAD-CAM Report, 4, 2007. Heidelberg: Dressler Verlag, 2007.
- [3] Weber, C.; Werner, H.: Schlussfolgerungen für „Design for X“ (DfX) aus der Sicht eines neuen Ansatzes zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen. . In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Design for X Beiträge zum 12. Symposium. Erlangen: o.V. 2001.
- [4] Haldenwanger, H.-G.: Leichtbau und Recycling im Automobilbau. Skriptum zur Vorlesung an der Universität Bayreuth, Bayreuth: 2007.
- [5] Sabath, S.; Dörnhöfer, A.: Formula Student: Mit CAE zur Pole-Position. In: CAD-CAM Report, 8, 2007. Heidelberg: Dressler Verlag, 2007.
- [6] Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion. 5. Auflage, Braunschweig: Vieweg-Verlag, 2001.
- [7] Haldenwanger, H.-G.: Zum Einsatz alternativer Werkstoffe und Verfahren im konzeptionellen Leichtbau von Pkw-Rohkarosserien. (Diss.) TU Dresden, 1997.

- [8] Dörnhöfer, A.; Rieg, F.; Kröninger, H.-R.: Leichtbau durch Einsatz von Topologieoptimierung. In N.N.: 5. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik. Dresden: N.N. 2007.
- [9] Wanke, S.; Deubel, T.; Weber, C.: Modellierung von Gussteilen mit einem parametrischen 3D-CAD-System – Ein Fallbeispiel. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Design for X Beiträge zum 14. Symposium. Erlangen: o.V. 2003.
- [10] Steinhilper, W.; Sauer, B. (Hrsg.): Konstruktionselemente des Maschinenbaus. Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen. Berlin: Springer Verlag, 2006.
- [11] Gerkens, M.; Kramer, B.; Langemeyer, S.: 3D-Modellierungsstrategien für Guss- und Schmiedeteile, Teil I. In: CAD-CAM-Report 03, 2005.36 – 40. Heidelberg: Dressler Verlag, 2005
- [12] Rieg, F.; Hackenschmidt, R.: Finite Elemente Analyse für Ingenieure. 2. Auflage, München: Hanser Verlag, 2003.

Dipl.-Ing. Alexander Troll
Dipl.-Ing. Andreas Dörnhöfer
Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg
Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD
Universität Bayreuth
Universitätsstrasse 30 D-95440 Bayreuth
Tel: +49-921-55-7109
Fax: +49-921-55-7195
Email: Alexander.Troll@uni-bayreuth.de
URL: <http://www.uni-bayreuth.de/departments/konstruktionslehre>

