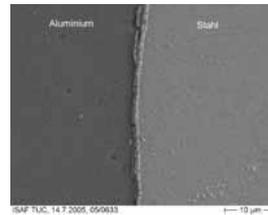


Vom Multi Material Design zum Finite Elemente Design



Schäfer, G.

Maschinenbauliche Konstruktionen sind zunehmend durch lokal extreme Anforderungen bei gleichzeitiger Schonung der Materialressourcen gekennzeichnet. Multi Material Anwendungen und aktuelle Entwicklungen in der Fertigungstechnik zur lokalen Modifikation von Werkstoffeigenschaften bieten dazu Lösungen an. Die Konstruktionslehre bietet für den effektiven Einsatz dieser werkstofflichen Lösungen, speziell bereits in der Konzeptphase, noch keine geeigneten Systematiken an. Überlegungen zum Finite Elemente Design (FED) greifen diese Fragestellung auf und ordnen die komplexen Einflussparameter zwischen Werkstoff, Technologie und Gestaltung mit dem Ziel einer semantischen Abbildung.



Metallic and composite structures have a wide application range in mechanical and process engineering. They are subject to many different tasks which are going to be more complex with variable local specifications. As an example, the geometry of a splined shaft-hub-connection leads obviously on the one hand to notch effect problems in special areas and on the other hand a very high wear resistance is needed on the flanks. Manufacturing processes such as cold forming and combined cutting, are increasing the material properties for different requirements by local effects. To balance the contradictions between the material resistance and the local stress concentration by means of plastic behaviour versus wear resistance and hardness leads in a perfect way to a design with a single material but multi material properties.

The use of such an advanced material design needs a detailed knowledge of the material properties. The knowledge has to be applied at the very beginning of the design process. The design process is a multidiscipline challenge between material science, design methodology and manufacturing, which can only be solved by concurrent engineering.

The necessary knowledge of accessible material properties, with regard to the manufacturing process, might be available by different databases, such as internal information, material supplier or public in the web from current research publications. In a guided search it might be possible to use new semantic web2.0-technologies like agents with ontologies, automated personal tagging and so on to provide this knowledge to the designer already in the conceptual design phase.

1 Einleitung

Dem Konstrukteur steht eine Vielzahl von Werkstoffen zur Funktionserfüllung zur Verfügung. In einfachen Anwendungsfällen ist es häufig ausreichend, das gesamte Bauteil „monolithisch“ aus einem Werkstoff herzustellen. In diesem Fall wird der am höchsten belastete Bauteilbereich zur Dimensionierung herangezogen und legt daher die Werkstoffkennwerte für das gesamte Bauteil fest. In den meisten Fällen erfolgt lediglich eine geometrische Anpassung. Diese Vorgehensweise ist bei komplex belasteten Bauteilen und Komponenten nicht effizient. Insbesondere bei konträren Anforderungen wie z.B. hoher Festigkeit und hoher Zähigkeit innerhalb eines Bauteils stehen dem Konstrukteur nur eingeschränkt Werkstoffe zur Verfügung.

Lösungen für diese Anwendungen stellen Verbundwerkstoffe (FRP) oder die Kombination verschiedener Werkstoffe im Multi Material Design (MMD) dar, siehe **Bild 2**. Weitere Lösungsansätze ergeben sich aus der möglichen lokalen Modifikation der Werkstoffeigenschaften, siehe **Bild 1**. So können die Werkstoffeigenschaften z.B. durch die Kombination von Spanen und Walzen oder Bake Hardening im Bereich dynamisch beanspruchter Bauteile positiv beeinflusst werden. Im Sonderforschungsbereich „Erzeugung hochfester metallischer Strukturen und Verbindungen durch gezieltes Einstellen lokaler Eigenschaften“ (SFB 675) werden an der Technischen Universität Clausthal und der Leibniz Universität Hannover solche Fertigungseinflüsse aktuell untersucht und optimiert.

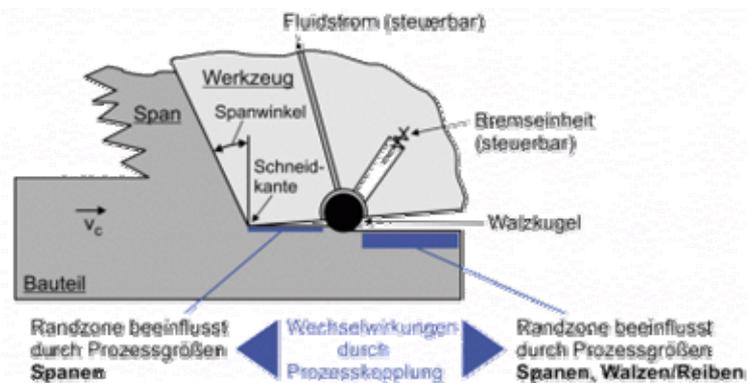


Bild 1: Kombiniertes Fertigungsverfahren Spanen-Walzen /1/

Eine ganzheitliche Betrachtung zur Erarbeitung allgemein gültiger Lösungsansätze erfordert dazu auch eine Erfassung der Wechselwirkungen zwischen den Verarbeitungsparametern, Eigenschaftsprofilen und dem Fügeverhalten. Das Ziel aktueller Überlegungen am IMW ist daher am Beispiel von Werkstücken mit einer sehr hohen Leistungsdichte eine neuartige Konstruktionssystematik auf Basis ortsaufgelöster Anforderungs- und Eigenschaftsprofile zu entwickeln (Finite Elemente Design, FED).

Es soll das interdisziplinäre Spannungsfeld zwischen Gestaltung, Werkstoff und Fertigung im finiten Volumenelement für die Auslegung und Herstellung hochbelastbarer Strukturen mit lokal eigenschaftsangepassten Werkstoffen genutzt werden. Dazu werden ortsaufgelöste Anforderungsmatrizen erstellt und mit Werkstoff- und Fertigungsprofilen unter Beachtung maximal möglicher Eigenschaftsgradienten korreliert. Diese neue Systematik (FED) kann anhand einer komplexen Konstruktionsaufgabe aus dem Bereich der Antriebstechnik für das Fügen eines rotationssymmetrischen Bauteils (Gelenkwelle) validiert werden.

Zur Erfüllung höchster Leistungsdichte hochfester Strukturen wird es häufig notwendig, unterschiedliche Funktionswerkstoffe in Integral- oder Verbundbauweise zu verwenden. Der Konstrukteur hat hierbei die Aufgabe, durch die Kombination von geeigneten Werkstoffen bestimmte Eigenschaften zu forcieren. Insbesondere die Möglichkeit durch Mischverbindungen an Komponenten und Bauteilen lokale Festigkeitssteigerungen zu realisieren, erweitert das Konstruktionspektrum erheblich.

2 Multi Material Design

Durch den Einsatz den örtlichen Beanspruchungen entsprechender Werkstoffe in einer Konstruktion ergeben sich große Kosten-Gewichtseinsparungs-Effekte, wie es am Multi Material Design in der Automobilindustrie deutlich wird, **Bild 2, /2/**. Die in der Literatur beschriebenen Untersuchungen zu diesem Thema befassen sich neben den Werkstoffentwicklungen und den Strategien zur Werkstoffauswahl im Wesentlichen mit den Bauweisentrends im Fahrzeugbau. Dabei wurde bereits frühzeitig erkannt, dass systematische Ansätze erforderlich sind, die eine ganzheitliche Bearbeitung von Konstruktion, Werkstoffeigenschaften und Herstellung gewährleisten.

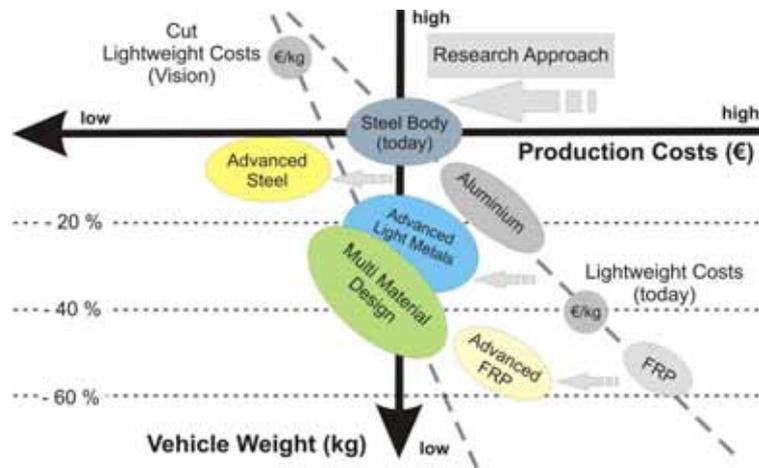


Bild 2: Kostenattraktives Multi Material Design im Karosseriebau /2/

Werkstoffverbindungen spielen bei der Umsetzung des Multi Material Design eine wichtige Rolle, da das Entwicklungspotenzial nur durch eine an die Mischbauweise angepasste Füge-technik voll ausgeschöpft werden kann /3/. Dabei sind sowohl thermische als auch bei unverträglichen Werkstoffkombinationen mechanische Fügeprozesse bzw. die Klebtechnik von großer Bedeutung.

Simulationsverfahren und FE-Analysen sind für die Mischbauweise eine unabdingbare Voraussetzung. Sie werden nicht nur für die Auslegung der Bauteile eingesetzt, sondern sind auch für die Belastbarkeit der Verbindungsstellen von entscheidender Bedeutung. In Hinblick auf eine rechnerunterstützte Konstruktions-systematik, die die Konstruktion, die örtlichen Werkstoffeigenschaften und die Fertigung gleichzeitig berücksichtigt, sind bisher keine Ansätze aus der Literatur bekannt. Es wird lediglich ein Ansatz für ein verbessertes thermisches Verhalten einer Multi Material Struktur beschrieben /4/.

Um die Anforderungen beim Einsatz funktionsorientierter Werkstoffe zu erfüllen, ist eine konstruktive Vorgehensweise erforderlich, die formal noch nicht existiert. Konstruktionsregeln, wie „werkstoffgerechtes“ oder „fertigungsgerechtes“ Konstruieren gelten ebenfalls nur für monolithische Bauteile. Die Abhilfe gelingt durch eine orts aufgelöste Betrachtungsweise im FED, die die Eigenschaftsprofile vom Werkstoff bzw. Fertigungsprozess in die Konzeptphase des Produktentstehungsprozess einbindet, die Technologie samt werkstofflicher Zusammenhänge - auch für Simulationsuntersuchungen zu Bau-

teil- und Funktionsverhalten - berücksichtigt, eine ganzheitliche Eigenschaftsverknüpfung gewährleistet und damit die Möglichkeit für eine vorausschauende Produktentwicklung bietet.

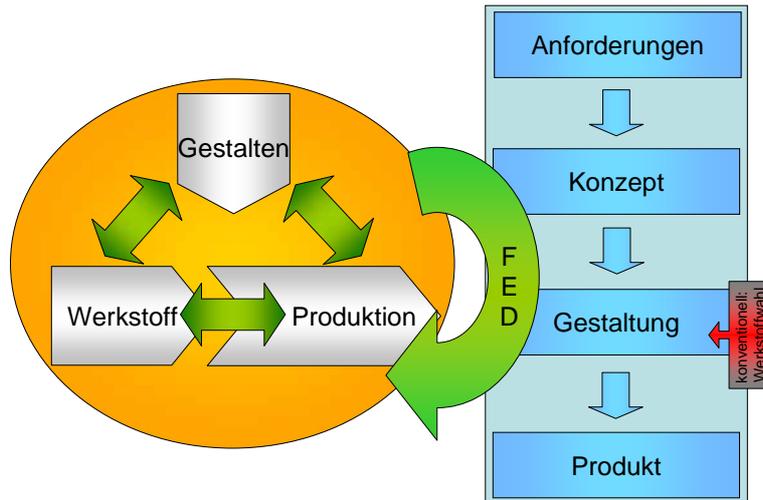


Bild 3: Vorgehen zur Entwicklung hochfester Strukturen aus einsatzoptimierten gefügten Mischverbindungen

3 Finite Elemente Design (FED)

Unter FED ist eine Konstruktionssystematik zu verstehen, die sich am finiten Bauteilelement als kleinste Konstruktionseinheit orientiert. In diesem System wird ein zu entwickelndes, bzw. zu optimierendes Bauteil in Bereiche verschiedener Anforderungen aufgelöst. Die Anforderungen an die Bereiche werden durch Anforderungsmatrizen beschrieben. Die konventionellen Vorgehensweisen betrachten ein Bauteil als Gesamtes, das verschiedene Anforderungen zu erfüllen hat. Durch die unzureichende Berücksichtigung von Werkstoff- und Fertigungspotenzialen kann hierbei nur in den seltensten Fällen ein Optimum bezüglich der Erfüllung aller Anforderungen erreicht werden. **Bild 4** zeigt exemplarisch das konventionelle, iterative Vorgehen bei der Konstruktion einer Zahnwellenverbindung. Die Anforderungen an das Bauteil gelten zum Teil nicht für das gesamte Bauteil sondern nur für lokal begrenzte Bereiche. So wird eine hohe Festigkeit und Oberflächenhärte im Bereich der Zahnwellen-Verbindung gefordert, während die eigentliche Welle über ein hohes Maß an Steifigkeit verfügen sollte.

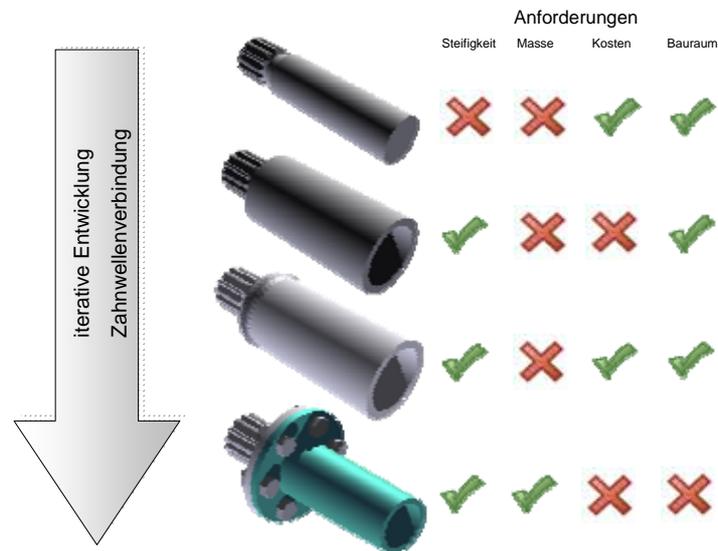


Bild 4: Iteratives Vorgehen bei der Konstruktion einer Zahnwellenverbindung

Durch die späte Berücksichtigung des Werkstoffes kann bei dieser Vorgehensweise auch erst in einem späten Konstruktionsstadium die Anforderungserfüllung überprüft werden. Die Abhängigkeit der Anforderungen voneinander macht bisweilen mehrere Iterationen notwendig und führt nicht zwangsläufig zur idealen Lösung. So führt, wie in **Bild 4** zu sehen ist, die Notwendigkeit der Anforderungserfüllung von einer monolithischen Zahnwelle (I) über eine monolithische Hohlwelle (II) und eine in Mono Material gefügte Hohlwelle (III) zu einer geschraubten Stahl/Aluminium Mischkonstruktion (IV). Die ideale Lösung, eine geschweißte Stahl/Aluminium Mischkonstruktion wurde bei dieser iterativen Vorgehensweise nicht gefunden, da die Kenntnis über die Fertigungstechnologie fehlte. Im FED werden hingegen für jedes Element die Anforderungsmatrizen mit Werkstoff- und Fertigungsparametern verknüpft und ermöglichen so bereits in der Phase der Konzeptfindung deren Berücksichtigung. Dies führt, unter Auslassung konventionell notwendigerweise zu durchlaufender Iterationen, zu einer schnelleren und innovativeren Lösung (**Bild 5**).

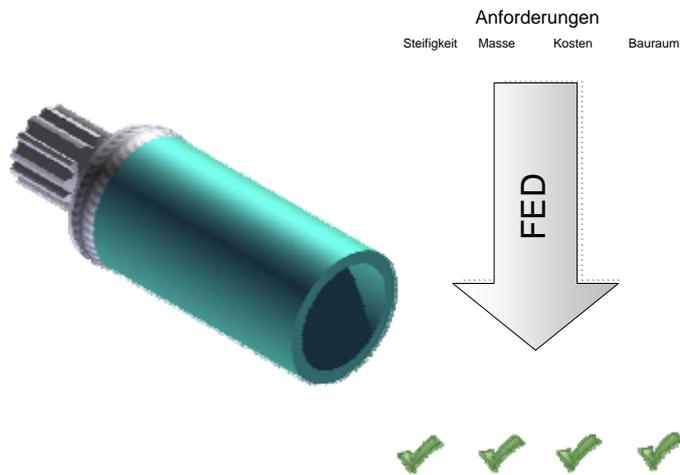


Bild 5: Lösungfindung durch Anwendung des FED

Insbesondere örtlich eigenschaftsveränderte Werkstoffe (SFB675) machen zur vollständigen Ausnutzung des Potenzials eine enge Kopplung von Werkstoffauswahl, Konstruktion und Fertigung erforderlich. Die an die lokalen Beanspruchungen angepassten Werkstoffeigenschaften können sowohl mit Hilfe unterschiedlicher Werkstoffe (Multi Material Design) als auch mit den im Rahmen des SFBs entwickelten modifizierten Werkstoffen realisiert werden. Bei Überschreitung eines gewissen Gradienten in den Eigenschaftsänderungen von einem Element zum nächsten ist eine örtliche Anpassung der Werkstoffeigenschaften notwendig. Dies kann entweder durch definierte Eigenschaftsänderung des gleichen Werkstoffs (z.B. lokale Verfestigung) oder durch Werkstoffwechsel (Mischbauweise) erzielt werden. In einer ersten makroskopischen Nutzung kann die FED-Vorgehensweise in Multi Material Design-Bauteilen durch Fügen realisiert werden. In der weiteren Entwicklung hin zur mikroskopischen Nutzung wird das System auf die im SFB 675 entwickelten Werkstoffe ausgedehnt. Dabei ergeben sich folgende konkrete Ziele:

- Eine an finiten Bauteilelementen orientierte Konstruktionssystematik (FED) für Mischverbindungen und lokal eigenschaftsgeänderte Werkstoffe mit der neuartigen Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Werkstoff-Fertigung-Gestaltung bereits in der Konzeptfindungsphase. Dies soll auch die numerische Simulation eines virtuellen Produkts schon in dieser Phase unterstützen. Lokal eigenschaftsgeänderte Strukturen sind bei dieser Vorgehensweise keine „Notlösung“ (z.B. Kugelstrahlbehandlung dauerschwing-

- bruchgefährdeter Bereiche), sondern sollen strategisch/konstruktiv angewendet werden
- die Systematisierung von finiten Funktionsbereichen, deren werkstofflicher Realisierung (incl. Fügen) und konstruktiver Beschreibung in semantischer Form sowie einer Ontologie zur Informationsrepräsentation
 - Schnittstellendefinition unter Berücksichtigung des ortsaufgelösten Eigenschaftsprofils der Mischverbindung (Leistungsprofil)
 - Beschreibung der fertigungsbedingten konstruktiven Randbedingungen aus den Fügeprozessen (Verarbeitungsbedingungen)

4 Informationsrepräsentation zur Lösungsfindung

Parallel zu diesen werkstoff-/fügetechnischen und konstruktionssystematischen Fragestellungen soll die dynamische Informationsgewinnung und -bereitstellung auf Basis von Agentensystemen und anforderungsspezifischen selbstformenden Suchmasken weiter verfolgt werden. Solche Systeme sind bereits im e-business in Form von persönlichen Produktangeboten erfolgreich implementiert und können auf spezifische konstruktive Anforderungen im Ansatz übertragen werden. Damit kann die starre Kopplung an eine Informationsdatenbank und deren begrenzte Ressourcen überwunden werden und adäquat auf flexible Produkthanforderungen bereits in der konzeptionellen Phase der Freiheitsgrad „Werkstoffwahl“ mitgenutzt werden.

Für die Entwicklung innovativer Produkte ist es demnach wichtig, Werkstoffe und ihre Eigenschaften mit Fertigungstechnologien sowie den Funktionen, die das Produkt erfüllen soll, in Zusammenhang zu bringen.

Bei der Integration und Zusammenarbeit mehrerer Fachbereiche und der damit entstehenden Fülle an Wissen, Daten und Informationen, wird der Lösungsfindungsprozess dynamisch und sehr komplex.

Um die Kombination der Informationen aus den Entwicklungsfeldern Werkstoffe, Technologie und Konstruktion für den Konstrukteur anwendbar und handhabbar zu machen, sollen Informationsagenten angewendet werden, die – ähnlich wie der Konstrukteur – im Moment des Bedarfs von Information gezielt Recherchen unternehmen und dabei den aktuellen Wissensstand in der jeweiligen Produktentwicklungsphase berücksichtigen können /5/.

Da es gerade in der frühen Phase der Produktentstehung oftmals schwierig ist konkrete Aussagen zu definieren, erscheint es wenig zielführend, wenn in Informationssystemen und Datenbanken ausschließlich nach Schlagworten gesucht wird. Eine Beschaffung, Korrelation und Analyse von verschiedenen Informationen aus verschiedenen Quellen, die zu einem entsprechenden Muster passen, erscheint

geeigneter, um eine innovative Produktidee entstehen zu lassen. Informationsagenten stellen Informationsbrücken zwischen Quellen und Nutzern dar. Die Filterung von Informationen erfolgt über definierte Nutzerinteressen, mit welchen Informationsquellen auf Schlüsselworte oder Eigenschaften hin verglichen werden. Der Einsatz von Informationsagenten eröffnet folgende Anwendungsmöglichkeiten /6/:

- Zugriff auf heterogene/verteilte Informationssysteme
- Auffinden und Filtern relevanter Daten
- Handhaben und Bearbeiten von Metadaten
- Zusammenführen und Darstellen von Informationen

Informationsagenten können anhand abstrahierter Deskriptoren nach artverwandten Aufgaben und deren Detaillösungen in beliebigen Datenbeständen suchen. Dem Konstrukteur werden diese Detaillösungen dann präsentiert, um seinen darauf aufbauenden kreativen Lösungsfindungsprozess anzuregen. Damit weitet sich sein Gesichtsfeld vom bekannten Lösungspfad deutlich zu einem Lösungsfeld hin auf (Morphologischer Kasten). In einem weiteren Schritt soll das System ein personalisiertes Profil entwickeln, in dem der Konstrukteur Lösungen zu seinem Spezialgebiet bevorzugt dargestellt bekommt. Das System soll also anhand erledigter Konstruktionsaufgaben die Ausrichtung des Konstrukteurs erlernen (personalisierte Seiten).

Wesentlich ist in diesem Zusammenhang die iterative Suche des Agenten, da ausgehend von bestimmten Anforderungen (z.B. Festigkeit und Zähigkeit) bestimmte Werkstoffe gefunden werden. Zu denen geeignete Formgebungsverfahren und spezielle Angaben zu geeigneten Fügeprozessen und deren Randbedingungen bereitgestellt werden sollen.

5 Zusammenfassung

Aktuelle Entwicklungen aus dem Zusammenwirken von Werkstoff- und Fertigungstechnologie eröffnen neue Gestaltungsmöglichkeiten, die effektiv bereits in der Konzeptphase der Produktentstehung Eingang finden sollten. Mit dem Finite Elemente Design (FED) wird eine dem lokalen Anforderungs- und Eigenschaftsprofil entsprechende Konstruktionsmethodik angeboten. Gleichzeitig erlaubt die damit verbundene Systematik eine Strukturierung des Wissens aus den verknüpften Bereichen Werkstoff, Gestalten, Fertigung und Fügen der Art, dass eine rechnerunterstützte semantische Suche von Agenten auf Basis von Ontologien möglich wird. Damit werden konstruktive Teillösungen mit ihren werkstofflichen und fúgetechnischen Einzelheiten auch in neuen Sinnzusammenhängen weiter verwendbar.

6 Literatur

- /1/ <http://www.sfb675.tu-clausthal.de/teilprojekte/b3/>
- /2/ Meschut G., Goede, M.: Neue Werkstoff- und Bauweisenkonzepte im Fahrzeugbau – Herausforderungen für thermische und wärmearme Fügeverfahren; Fügen im Fahrzeugbau; Bb. 9. Internationales Aachener Schweißtechnik Kolloquium, 29. – 30.06.2004; S. 37 – 48
- /3/ Stich, A.: Neue Werkstoff- und Verfahrenstechnologien im PKW-Bau – eine Zukunft für Werkstoffforschung und –entwicklung; Industriekolloquium „Fertigen in Feinblech (2004) S. 23 – 25
- /4/ Blouin, V. Y., Oschwald, M., Hu, Y., Fadel, G. M.: Design of functionally graded structures for enhanced thermal, behavior; Design Automation Conference, 31 (2005), S. 835 – 843
- /5/ Lütkepohl, A.: Anforderungsgetriebene Konstruktionsmethodik zur werkstoffgerechten Lösungsfindung. Abschluss-symposium zum Paketantrag „Kompatibilisierungsmethoden“, 16.11.2006, Clausthal
- /6/ Müller, D.: Intelligente Unterstützung für ein aufgabenorientiertes Anforderungsmanagement in der Integrierten Produktentwicklung. Dissertation, TU Clausthal, 2006