

## Methodische Entwicklung und Optimierung einer Prototypenreihe

Markus Zimmermann, Jochen Zapf, Frank Rieg  
*Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD;  
Universität Bayreuth*

### 1 Einleitung

Eine mechanische Konstruktion stützt sich neben dem eigentlichen Design der Komponenten auf eine möglichst genaue Simulation der physikalischen Realität. Dadurch ist der Konstrukteur direkt in der Lage, das Verhalten der Einzelteile sowie des gesamten Systems vorherzusagen. Dabei auftretende konstruktive Schwachstellen können so während des Produktentwicklungsprozesses erkannt und vor der Fertigung der ersten Prototypen behoben werden. Dieser Beitrag beschreibt Simulationsketten während der Entwicklung zwei aufeinander aufbauender Prototypen eines Gasentspannungsaggregates (PT1 und PT2). Dieses wird im Zusammenhang mit einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage eingesetzt. Das Entspannungsaggregat dient dazu, ein unter Druck stehendes dampfförmiges Medium zu entspannen und die auf den Kolben wirkende Kraft mit Hilfe eines Generators in elektrische Energie umzuwandeln. Anwendung finden dabei zwei organische Gase, die bei hoher Temperatur von 150 °C bzw. 350 °C eingesetzt werden.

Der erste Prototyp (PT1) diene zur prinzipiellen Untersuchung der Machbarkeit. Nach diesen Erfahrungen wird der zweite Prototyp (PT2) entwickelt. Dabei steigt die Modellkomplexität hinsichtlich der Belastungsfälle und Anforderungen.

Der in Abbildung 1 dargestellte Kreislauf zeigt die Anordnung der nachfolgend beschriebenen Prototypen. Der PT2 wird dabei im Niedertemperaturkreislauf, der PT3 im Hochtemperaturkreislauf eingesetzt. Die oben stehende Wärmequelle ist im beschriebenen Fall eine Pellet-Heizung, kann aber prinzipiell eine beliebige Wärmequelle sein.

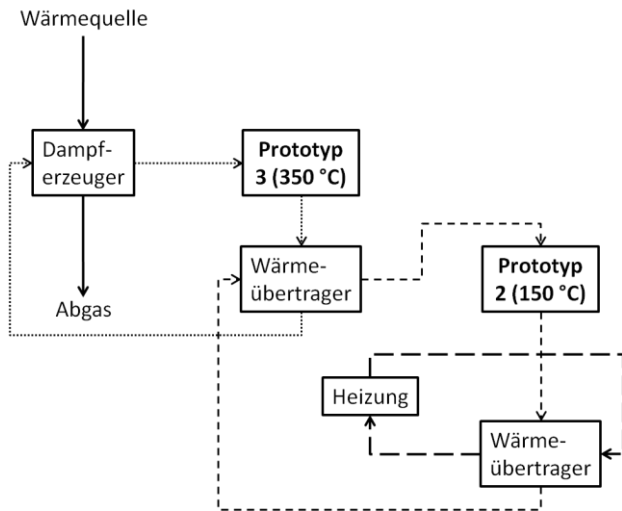


Abbildung 1: Wärmekreislauf mit Einordnung der Prototypen

## 2 Problemstellung

### 2.1 Modellabsicherung

Zur Absicherung der Qualität neuer Produkte ist die Überprüfung der jeweils geforderten Eigenschaften unabdingbar. Hierbei müssen sowohl die wirtschaftlichen, sowie gesetzlichen Aspekte (Compliance), als auch die technisch-funktionalen Anforderungen berücksichtigt werden.

Zur Funktionsabsicherung können, abhängig von den Randbedingungen eines Systems, verschiedene computergestützte Werkzeuge zum Einsatz kommen. Mit Hilfe moderner Software kann das Bauteilverhalten unter Einsatzbedingungen frühzeitig abgeschätzt werden. Um grundlegende Ansprüche wie Belastungs- oder Fertigungsgerechtigkeit zu erfüllen, ist es notwendig, den DfX-Kriterien situationsgerecht CAx-Werkzeuge (Computer Aided X) zuzuordnen und diese auf effiziente Weise zu Prozessketten zu kombinieren [1].

---

Die Vielzahl der in den Firmen eingesetzten, bzw. auf dem Markt verfügbaren CAx-Werkzeuge macht ein methodisches Vorgehen zur Handhabung der Komplexität dieses Themengebietes erforderlich. Einen integralen Bestandteil bildet dabei die ICROS-Methode (Intelligent CROSS-linked Simulations), die den Entwickler durch konkrete Prozessabfolgen und spezifische Handlungsempfehlungen unterstützen soll [2].

Hierbei ist es zunächst notwendig, die Programme zu klassifizieren, wobei die Definition nach Weber [3] verwendet wird: Demnach können Merkmale durch den Konstrukteur direkt beeinflusst werden. Die resultierenden Eigenschaften jedoch können nur indirekt über die Merkmale gelenkt werden. Bauteilmerkmale wie Abmaße etc. können mit Synthesewerkzeugen generiert werden. Zu dieser Klasse gehören u. a. CAD-Werkzeuge (Computer Aided Design). Resultierende Spannungen und Verschiebungen unter Belastung hingegen zählen zu den Eigenschaften eines Produktes und können in der Praxis mit Analysewerkzeugen wie FEA-Programmen (Finite-Elemente-Analyse) [4] berechnet werden.

Wenn das Produkt die geforderten Eigenschaften nicht erfüllt, so muss im Rahmen gezielter Iterationen zu einem vorangegangenen Syntheseschritt zurückgesprungen werden. Zur Effizienzsteigerung dieser Syntheseschritte ist es empfehlenswert, den Konstrukteur mit Elementaranweisungen zu unterstützen. In Kombination mit der Schwachstellenanalyse, die durch die entsprechenden Berechnungsprogramme durchgeführt wird, ist es damit möglich, entsprechende Merkmale effizient nachzubessern, worauf in Kapitel 3 näher eingegangen wird.

Durch eine eingehende Analyse des Funktionsumfanges von CAx-Werkzeugen im Rahmen des FORFLOW-Projektes [5] können auf Basis der Anforderungen an ein Produkt die erforderlichen Komponenten zu dessen Konstruktion, Absicherung und Optimierung abgeleitet werden. Mit Hilfe der ICROS-Methode können diese zu Prozessketten zusammengestellt werden, was in einem Wechselspiel von Synthese- und Analysewerkzeugen mit entsprechenden Rücksprungpunkten resultiert. Die Anwendung zur Entwicklung einer Prototypenreihe wird in Kapitel 3 erläutert.

Zunächst soll jedoch im folgenden Abschnitt auf die Anforderungen sowie die Vorgehensweise bei der Erstellung einer Prototypenreihe eingegangen werden. Diese basiert auf dem „lessons learned“-Prinzip: das heißt einerseits, dass Erkenntnisse aus vorangegangenen Modellen in das nachfolgende einfließen, um die einzelnen Prinziplösungen zu verfeinern und zu validieren; andererseits bedeutet dies eine steigende Modellkomplexität, um, neben der

---

eigentlichen Machbarkeit und der technischen Funktionserfüllung, einen immer breiteren Bereich der Anforderungen an ein potentielles Serienbauteil abzudecken.

## 2.2 Konkrete Aufgabenstellung

Die Herausforderung besteht in der Entwicklung zweier Prototypen, die zwar direkt aufeinander folgend entwickelt werden und von ihrer Funktion her eine ähnlichen Zweck erfüllen sollen, jedoch von der Art der Konstruktion grundlegend verschieden sind. Zum Einsatz kommt der erste Prototyp als eigenständiges Aggregat, welches nur zur Untersuchung der Dichtigkeit der verwendeten Tellerventile und der Entwicklung der Ventilmotor- sowie Generatorelektronik dient. Der zweite Prototyp dagegen wird im Zusammenhang mit der Kraft-Wärme-Kopplungseinheit betrieben und dient der Entspannung des erhitzten Gases Isopentan von 150 °C auf 70 °C. Die Aufgaben und damit die Konstruktion unterscheiden sich daher deutlich. Die eigentliche Aufgabe, die Entspannung eines Gases, bleibt jedoch gleich. Eine weitere Herausforderung liegt in der Verwendung von Isopentan als solches. Dieses Gas wirkt entfettend, wodurch eine Ölschmierung, besonders der dynamischen Komponenten wie Kolben- und Stangendichtung, nicht möglich ist. Zur Erfüllung der konstruktiven Anforderung des Trockenlaufs müssen daher entsprechende Dichtungen gefunden werden.

## 3 Vorgehen

### 3.1 Belastungsfälle

Bei der Erstellung eines virtuellen Prototyp soll ein möglichst realitätsnahes Computermodell geschaffen werden, um das spätere Bauteilverhalten möglichst präzise abschätzen und ggf. korrigierend eingreifen zu können. Aus 2.2 lassen sich hierfür folgende Lastannahmen ableiten:

Die Verwendung des PT1 als Druckluftentspannungsaggregat bedeutet, dass die Bauteile wie Entspannungszyylinder, Ventilsitz- und Ventilführungsaufnahme mit einem Innendruck von 20 bar belastet sind. Daher genügen in diesem Fall ein Syntheseschritt zur Baugruppenerstellung sowie wenige Analyseschritte zur Absicherung der Festigkeit der Bauteile. Die Betriebsfrequenz des PT1 beträgt 10 Hertz.

Das Einlassventil des PT1 weist die Besonderheit auf, dass es entgegen der „normalen“ Öffnungs- und Schließrichtung eines Tellerventils arbeitet (Abbildung 2). Dies ist notwendig, da das Ventil 80% der gesamten Zykluszeit

des Aggregates geschlossen ist und der höhere Systemdruck immer hinter dem Ventil ansteht. Die Lösung, das Ventil invers öffnen und schließen zu lassen, folgt damit dem Gestaltungsprinzip „Eindeutig, Einfach und Sicher“ nach Pahl/Beitz [6]. Es stellt eine selbstverstärkende Lösung da. Das Funktionsprinzip des inversen Öffnungs- und Schließverhaltens bedingte eine Strömungssimulation und nachfolgende strömungsangepasste Optimierung des Einlasskanals.

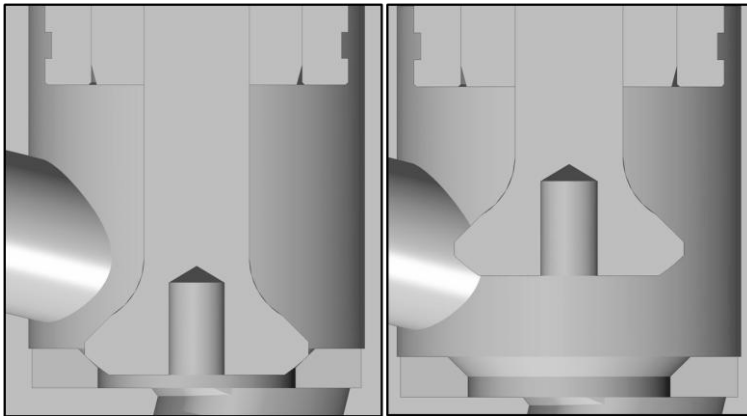


Abbildung 2: Einlassventil PT2 (links: geschlossen, rechts: offen)

Der zweite Prototyp wird neben der Druckbelastung zusätzlich mit der Temperatur von 150 °C des unter Druck stehenden Gases beaufschlagt, was die Materialbelastung durch eine thermische Komponente weiter erhöht. Diese Gas gibt eine Teil der Wärme in der Vorkammer des Einlassventils an die umliegenden Bauteile teilweise ab. Aufgrund der Erwärmung dehnen sich diese Bauteile aus, was bei zu geringen Toleranzen zwischen den Bauteilen zu einem erheblichen Kontaktdruck und damit einer zusätzlichen Druckbelastung führen kann. Dieses Verhalten kann mittels einer thermischen Simulation abgeschätzt werden. Zudem wird die Betriebsfrequenz des PT2 auf 15 Hertz erhöht. Bei einem späteren Prototyp, welcher mit 350 °C betrieben wird, ist dies nochmals konstruktiv komplizierter.

### 3.2 Durchführung

Da der erste Prototyp nur mit Druckluft betrieben wird, musste keine thermische Simulation der Bauteile sowie der gesamten Baugruppe erfolgen. Die Druckbelastung von 20 bar wurde mit Hilfe einer mechanischen FE-Analyse simuliert und so die Haltbarkeit der Bauteile nachgewiesen. An dieser

---

Stelle wurde noch kein besonderes Augenmerk auf das Strömungsverhalten und die kompakte Bauweise gelegt, da der erste Prototyp lediglich die Funktion sicherstellen sollte. Die Kostenentwicklung der verwendeten Kaufteile wurde jedoch bei jedem Prototyp verfolgt.

Die Entwicklung des PT1 folgte dabei den Hauptanforderungen wartungsgerecht und fertigungsgerecht. Aufgrund des bisher unbekanntem Verschleißverhaltens der Bauteile, des PT1 wurden diese sehr variabel entworfen. Fast alle Bauteile an denen ein hoher Verschleiß in kurzer Zeit zu erwarten ist, sind leicht zugänglich und austauschbar. Dazu gehören Ventilsitzring und Kolbenstangendichtung. Der Ventilsitz zum Beispiel befindet sich in einem eigenen Träger, so dass dieser ohne großen Aufwand ausgewechselt werden kann. Der Ventiltrieb erfolgte ausschließlich durch Linearmotoren, die den Vorteil einer vollständig variablen Ventilhubkurve bieten. Die nachfolgende Analyse der so ermittelten möglichst idealen Ventilhubkurve erlaubt die gezielte Entwicklung eines kompakteren und kostengünstigeren Ventiltriebs. Alle Bauteile und auch die Montage der gesamten Baugruppe erfolgen während der Konstruktion und nach Abschluss der Erstellung des virtuellen Prototyps nach Absprache mit der Fertigung.

Zur abschließenden Absicherung des virtuellen Prototypen wurden nach der Fertigstellung aller Bauteile und anschließenden Montage des PT1 zunächst ein Dichtigkeitstest durchgeführt, wobei sich herausstellte das die gewählte Lösung, bestehend aus Tellerventilen und Ventilsitzringen, eine unzureichende Dichtigkeit aufweist. Die Ursache war eine Aufsummierung von Toleranzen, die sich gegenseitig negativ für die Funktion der Ventilbaugruppe auswirkten, was dazu führt, dass das Ventil nicht mehr genau zentrisch auf den Ventilsitzring aufsetzt. Eine Nachbearbeitung des Ventilsitzes, welches aufgrund der modularen und damit wartungsgerechten Ausführung leicht möglich war, erbrachte dann eine ausreichende Dichtigkeit. Ferner zeigte sich, dass die Ventilschließkraft für spätere Prototypen zu gering sein wird, da sich die Ventilschließzeiten verkürzen werden.

Nach dem erfolgreichen Test der PT1 begann die Entwicklung des PT2, was nach dem „lessons learned“ Prinzip erfolgte. Die Halterung der Ventileinleitung und die des Ventilsitzes wurden für das Auslassventil in ein und dasselbe Bauteil verlagert. Dies stellt die optimale Ausrichtung der beiden Teile zueinander sicher. Beim Einlassventil wurde darauf geachtet, dass möglichst wenige Toleranzen beim Fügen der Teile vorhanden sind. Da sich schon am PT1 größere Strömungsverluste aufgrund der nicht optimierten Form des Einlasskanals gezeigt haben, fokussierte sich die Konstruktion auf diesen Teilaspekt. Die erste Simulation zeigte, dass sich aufgrund der Geometrie starke

Verwirbelungen in der Vorkammer des Ventils bilden. Daher wurde in einem zweiten Konstruktionsschritt der Vorkammerraum so geändert, dass sich die Verwirbelungen offensichtlich verringern, wie Abbildung 3/Abbildung 4 zeigt. Nach der Simulation und Optimierung des Einlasses erfolgte die Untersuchung des Auslasskanals. Hier zeigte sich jedoch, dass das Gas nach der Entspannung noch mindestens 2 bar Überdruck besitzt und ein Ausströmen damit trotz einiger Verwirbelungen sichergestellt ist. Unterstützend wirkt der Kolben, der das Gas aus dem Entspannungszyylinder schiebt.

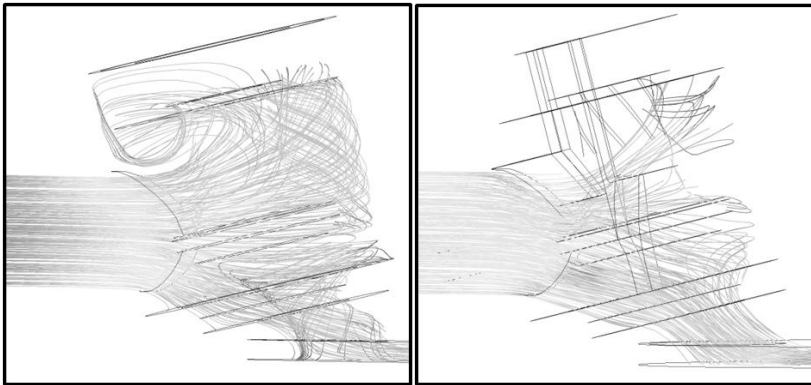


Abbildung 3: Strömung ohne (links) und mit Strömungsleitern (rechts)

Anschließend erfolgt die thermische Simulation der Bauteile bei 150 °C, um die thermische Dehnung zu bestimmen. Dies ermöglicht eine Aussage über den thermisch induzierten Verzug der Bauteile einzeln und kombiniert in der Baugruppe und erlaubt die Funktionssicherheit vorauszusagen. Hier fand die Konvektion an die Umgebung Berücksichtigung, um ein möglichst realitätsnahes Ergebnis zu erhalten. Im Anschluss erfolgte die Untersuchung der vorhandenen mechanischen Belastung von 20 bar. Die abschließende Analyse enthält die Kombination aus thermischer und mechanischer Dehnung.

Die Erkenntnis der zu großen Ventilschließzeiten bei den nachfolgenden Prototypen wurde bei dem PT2 in der Hinsicht berücksichtigt, dass ein unterstützend wirkender Federmechanismus am Ventiltrieb entworfen wurde. Da es sich um zwei gegeneinander arbeitende Federn handelt, wirkt die Federkraft unterstützend beim Öffnen sowie beim Schließen des Ventils.

### 3.3 Optimierung

Wie sich schon während der CFD-Analyse des Einlasskanals gezeigt hat, entstehen um das Ventil starke Verwirbelungen, so dass das Fluid nicht gleichmäßig in den Zylinder einströmen kann. Die zur vollständigen Füllung des Zylindertotvolumens notwendige Gasmenge muss jedoch in einer vorgegebenen Zeitspanne von 6 Millisekunden einströmen können, um so die geforderten Frequenz von 15 Hertz zu erreichen. Daher ist eine verbesserte Führung des Einlassvolumenstroms notwendig. Auf Basis der Resultate der CFD wurden Strömungsleiter (Abbildung 4) als eigenständige Einsätze innerhalb des Einströmbereiches konstruiert. Diese lenken die Strömung möglichst direkt in den Zylinder, so dass wesentlich weniger Verwirbelungen entstehen können. Die Überprüfung der Strömungsverhältnisse zeigte eine signifikante Verbesserung des Strömungsverhaltens des Fluids (Abbildung 3).

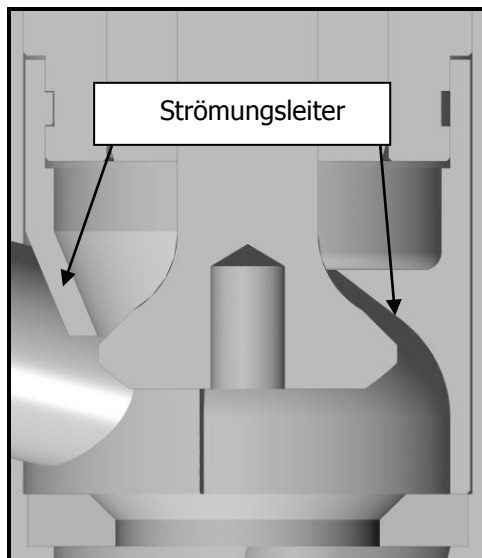


Abbildung 4: Strömungsleiter am Einlasskanal des PT2

### 3.4 Ergebnisse

Die vorliegenden Simulationsergebnisse werden zunächst einzeln, nach ihrer Belastungsart und abschließend kombiniert, auf das gesamte Entspannungsggregat wirkend, analysiert. Dabei werden mit Hilfe der ICROS-Methode das weitere Vorgehen zur Optimierung der Prototypen und die konstruktive Annäherung an die technischen Anforderungen bestimmt. Dies





---

erfolgt in den Schritten: Analyse der Erstkonstruktion, Optimierung der Konstruktion mit einem CAD-System als Synthesewerkzeug auf Basis der Analyseerkenntnisse, iterative konstruktive Verbesserung.

Während der Optimierung des Einlasskanals wurde gleichzeitig die auf die Bauteile wirkende Kraft aufgrund des strömenden Fluids berechnet. Dabei zeigte sich, dass die wirkenden Druckkräfte unterhalb von  $0,5 \text{ N/mm}^2$  liegen. Daher wurde diese Belastung zunächst nicht für die mechanische Auslegung der Strömungskomponenten herangezogen. Die Berücksichtigung der Strömungsbelastung wird erst bei der Berechnung der kombinierte Strömungs- Temperatur- und Druckbelastung während der abschließenden Simulation der Gesamtbaugruppe beachtet.

Die alleinige thermische Belastung der Bauteile sowie der Baugruppe erbrachte, dass die Temperaturdehnung aufgrund der großen thermischen Masse sehr gering ausfallen und einen Spitzenwert von lediglich  $1,5 \mu\text{m}$  aufweisen, was im unterkritischen Dehnungsbereich der Bauteile liegt. Da sich der PT2 konstruktiv stark von dem PT1 unterscheidet, muss das Bauteilverhalten unter der oben beschriebenen Druckbelastung neu bewertet werden. Jedoch sind auch hier sowohl die Verschiebungen als auch die Spannungen, die durch den Innendruck von 20 bar hervorgerufen werden, weit außerhalb des kritischen Bereiches des Materials.

Durch die Federunterstützung ist es zudem gelungen, die Ventilöffnungs- und -schließzeiten von 10 Millisekunden beim PT1 auf 6 Millisekunden, beim PT2 zu verringern. Damit wird die gesteigerte Betriebsfrequenz des PT2, im Vergleich zum PT1, überhaupt möglich.

## 4 Ausblick

Die abschließende Bewertung des Systems unter der kombinierten Last von Strömung, Temperatur und Druck steht noch aus, da sich das Simulationsmodell noch im Aufbau befindet. Die Analyse der Berechnung wird weiteres Optimierungspotential aufzeigen. Nach der Validierung der Prinziplösungen durch PT1 und PT2 ist in einem weiteren Schritt die Entwicklung des dritten Prototypen PT3 geplant, der mit 1,3,5-Trimethylbenzol bei  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  betrieben werden soll. Die bisher gewonnenen Ergebnisse fließen dabei in die Entwicklung mit ein. Einige Lösungen des PT2 sind jedoch nicht geeignet für die Anwendung im PT3. Zur belastungsgerechten Auslegung des Prototypen müssen z.B. für die Dichtungen aus Verbundstoffen wie Teflon und Kohlenstoff, die für diese Temperaturen nicht ausgelegt sind, andere Lösungsansätze gefunden werden.

---

Als weiterer Ansatzpunkt zur Fertigungs- sowie Kostenoptimierung des Systems ist der Übergang von Fräs- zu Gussteilen, wobei die Auswahl der CAx-Werkzeuge und der notwendigen Arbeitsschritte abermals nach der ICROS-Methode erfolgt. Hierbei muss unter Berücksichtigung entsprechender Gestaltungsrichtlinien und Elementaranweisungen die Konstruktion der Einzelteile überarbeitet und angepasst werden [6]. Die Geometrie des Zylinderkopfes, aber auch die Ventil- und Ventilführungshalterungen bieten sich für diese Fertigungsmethode an. Durch ein methodisches Vorgehen im Rahmen der Anpassungskonstruktion können hierbei signifikante Einsparungen bei Fertigungszeit und -aufwand erzielt werden. Gerade im Hinblick auf die spätere Serienproduktion des Entspannungsaggregates muss die Fertigungs-, Montage- und Kostengerechtigkeit des Produktes neben der erprobten technischen Umsetzung der Anforderungen im Mittelpunkt einer langfristigen Produktionsplanung stehen.

## Literatur

- [1] Vajna, S. et al.: „CAx für Ingenieure“, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2009.
- [2] Alber, B.; Rieg, F.; Hackenschmidt, R.: Product design with high-tech-polymers – Practical use of CAE-Tools with cross-linked simulations and experimental verification. In: Materialprüfung, Carl Hanser Verlag, München, 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] Rieg, F.; Hackenschmidt, R.: „Finite Elemente Analyse für Ingenieure“, 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2009.
- [5] FORFLOW - Bayerischer Forschungsverbund für Prozess- und Workflowunterstützung zur Planung und Steuerung der Abläufe in der Produktentwicklung: Abschlussbericht. Hrsg: Meerkamm, H.; Paetzold, K.: DRUCKLADEN Erlangen, Erlangen, 2009.
- [6] Pahl, G.; Beitz, W. et al.: "Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen", Springer Verlag, Berlin, 2007.