

Integration der Simulation in die Produktentwicklung

Neue Möglichkeiten zur Steigerung der Qualität und Effizienz in der Produktentwicklung

Albert Albers

Lukas Nowicki

Universität Karlsruhe (TH)

Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau (mkl), Karlsruhe

Kurzfassung

Heute wird in vielen Bereichen die Forderung nach einer weiteren Verkürzung der Produktentwicklungszeiten erhoben. Gleichzeitig zeigt die zunehmende Anzahl an Rückrufaktionen, dass sicherlich in manchen Fällen bereits die kritische Produktentwicklungszeit unterschritten worden ist. Aufgrund der Vorgaben des globalen Wettbewerbs wird es aber nicht möglich sein, die Produktentwicklungszeiten wieder stark zu verlängern. Deshalb muss, durch eine Verbesserung der Produktentwicklungsprozesse, eine erhöhte Sicherheit in der Vorhersage erreicht werden. Dies kann nur auf der Basis eines Vorziehens der Lernkurve mit entsprechend leistungsfähiger Unterstützung durch Simulationswerkzeuge und neue Entwicklungsmethoden erreicht werden. Die Integration der neuen Möglichkeiten, die die Simulation bietet, in die gezielte Produktentwicklung durch einen Entwicklungsprozess, der auf einer virtuellen Produktmodellierung inklusive virtueller Validierungsphase beruht, stellt erhebliche Anforderungen an das Methodenwissen, die Prozessabstimmung und die Qualifikation der Mitarbeiter.

Es soll in diesem Beitrag der Zusammenhang zwischen Simulationswerkzeugen, Simulationsprozessen sowie Entwicklungsprozessen aufgezeigt und die Potentiale zur weiteren Optimierung und Verbesserung von Produktentstehungsprozessen diskutiert werden.

1 Status Quo

Die zunehmende Globalisierung der Märkte sowie der wachsende Wettbewerb führten in letzten Jahrzehnten zur drastischen Verkürzung der Produktlebenszyklen. So zum Beispiel verringerte sich im Maschinenbau seit 1991 die durchschnittliche Produktlebensdauer von dreißig auf zwölf Monate [1,2]. Diese Situation zwingt die Unternehmen zu kürzeren Entwicklungszeiten sowie niedrigeren Produktentwicklungskosten. Ein im Wettbewerb erfolgreiches Unternehmen unterscheidet sich von der Konkurrenz in dem es seine Produktentwicklungszeit um bis zu achtzig Prozent verkürzen und die Entwicklungskosten um fünfunddreißig Prozent senken kann bei gleichzeitiger Verringerung des Qualitätsaufwands um dreißig Prozent [3]. Dabei stehen die drei Aspekte Entwicklungszeit, Entwicklungskosten und Qualitätsaufwand in einer engen Wechselwirkung zueinander. Schnellere Entwicklung bedeutet Finanzersparnis, birgt jedoch die Gefahr einer ungenügenden Anlaufreife mit sich, was wiederum mit einer Nachentwicklung und Zusatzkosten verbunden ist. Höherer Qualitätsaufwand führt durch die höhere Anzahl an Iterationsschleifen im Produktentwicklungsprozess die zu einer Verlängerung der Entwicklungszeiten und wirkt sich dadurch negativ auf die Entwicklungskosten aus, z.B. auf Grund geänderter Fertigungsverfahren. Eine positive Änderung aller Einflussfaktoren ist nur durch die Integration der virtuellen Produktentwicklung in den Produktentwicklungsprozess sowie den konsequenten Einsatz innovativer Simulationsmethoden möglich.

Betrachtet werden soll zunächst der klassische Produktentwicklungsprozess (Abbildung 1). Der Weg von der Idee eines Produktes bis zum Vertrieb setzt sich aus mehreren Phasen zusammen. Unter Berücksichtigung der vorgegebenen Anforderungen wird ein Produktkonzept erstellt, der nach einer konstruktiven Umsetzung des Lösungsvorschlags als Prototyp angefertigt und anschließend validiert wird. Beim Versagen des Experimentes ist eine Modifikation des Entwurfs, in manchen Fällen sogar eine Modifikation des Konzeptes notwendig. Die Simulation spielt dabei eine untergeordnete Rolle und wird in der Regel nur bei der Suche nach der Ursache des Versagens eingesetzt. Diese Vorgehensweise wird iterativ fortgesetzt, bis die Validierung erfolgreich abgeschlossen ist. Nach der Vorbereitung der Produktionsanlagen erfolgt der Serienanlauf.

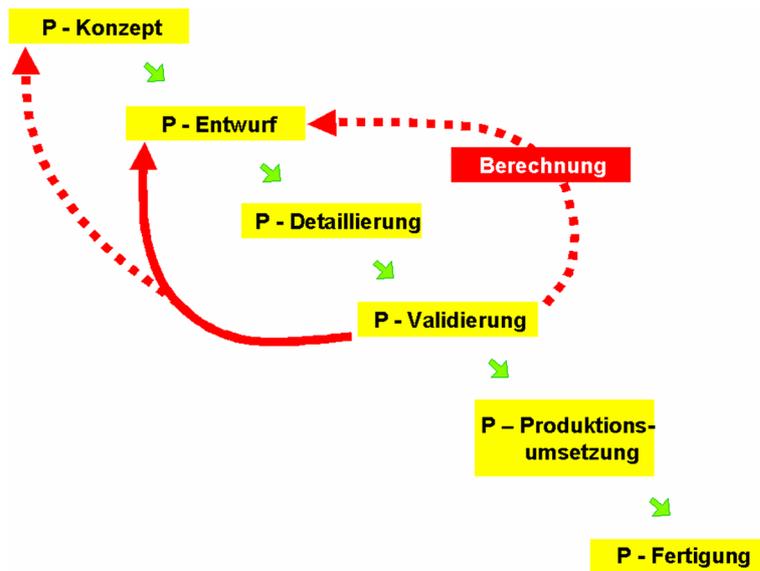


Abbildung 1: Klassischer Produktentwicklungsprozess

Betrachtet man sich die anfallenden Kosten in den einzelnen Entwicklungsphasen, erkennt man, dass die Konzeption und Konstruktion lediglich fünf Prozent der Gesamtkosten ausmachen. Gleichzeitig werden in der Konzeptphase ca. siebzig Prozent aller Produktentwicklungskosten festgelegt. Es ist deshalb empfehlenswert die, in Abbildung 1 dargestellte Iterationsschleife in der Konzeptphase mit virtuellen Prototypen durchzuführen.

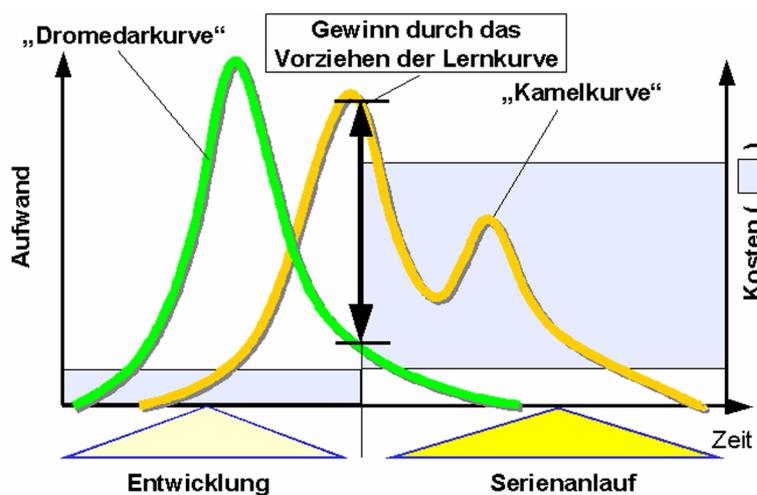


Abbildung 2: Qualitätsaufwand und Kosten im Produktentwicklungszyklus

Wie in Abbildung 2 mit der „Dromedarkurve“ dargestellt ist durch die Verwendung von Simulationsverfahren in der Entwicklungsphase zunächst ein höherer Aufwand durch die zusätzliche Erstellung der Simulationsmodelle notwendig. Doch durch die Reduktion der Anzahl an Iterationen, die beschleunigte Durchlaufzeit pro Iterationsschleife sowie Kostenersparnis beim Bau neuer

Prototypen ist diese Vorgehensweise mehr als gerechtfertigt. Je größer die Kenntnis über die Eigenschaften der virtuellen Bauteile und deren Einfluss auf das Systemverhalten des gesamten Produktes ist, je früher die Fertigungsaspekte in die Gestaltungskonzepte einbezogen werden, umso effizienter ist der gesamte Entwicklungsprozess.

2 Einsatz numerischer Methoden im Produktentwicklungsprozess

Entsprechend der Forderung der Integration der Simulationsmethoden in die Produktentwicklung sowie des Vorziehens der Lernkurve in die frühe Konzeptphase muss der Entwicklungsprozess modifiziert werden. Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, vereint die neue Konzeptphase die klassische Konzeption und den Entwurf. Die unten dargestellte Zuordnung der Simulationsmethoden den einzelnen Phasen des Entwicklungsprozesses dient einem groben Überblick und hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie ist firmenspezifisch und sehr stark vom Produkt abhängig. Im Weiteren soll anhand ausgewählter Beispiele das Potential der numerischen Methoden aufgezeigt werden.

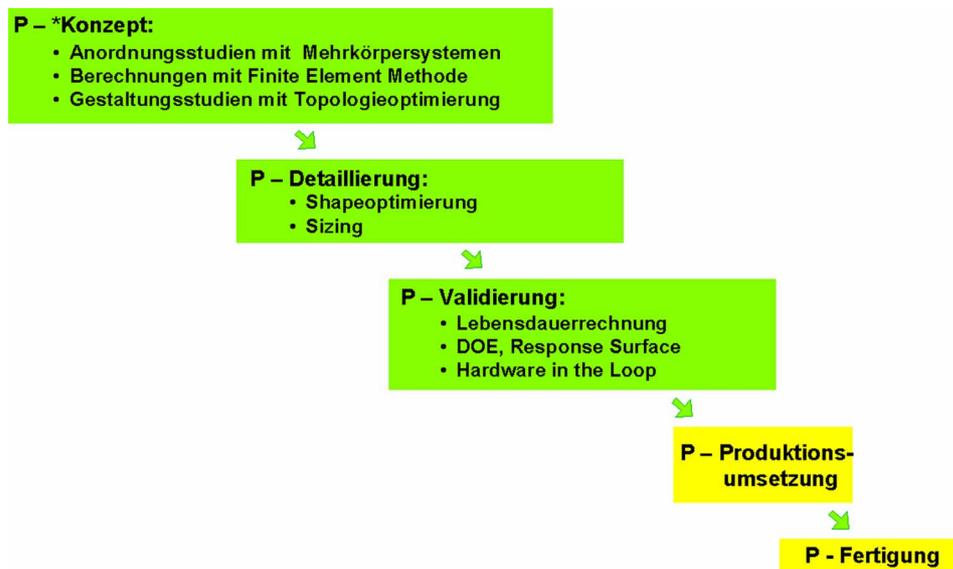


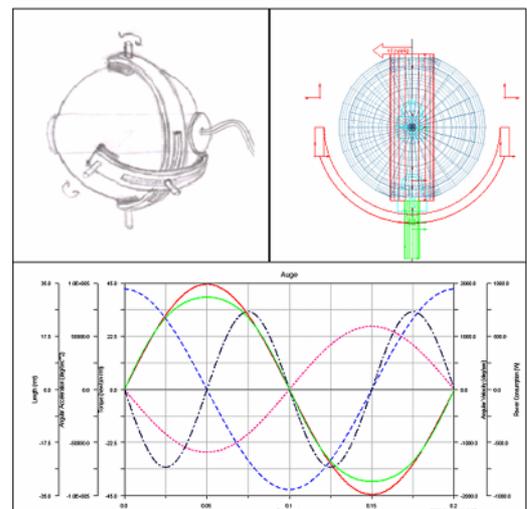
Abbildung 3: Integration der Simulation in den Produktentwicklungsprozess

2.1 P-*Konzept: Voraussage der Eigenschaften des virtuellen Produktes

Abbildung 4: MKS in der Konzeptphase

In dieser sehr frühen Phase der Entwicklung gilt es Konzeptlösungen mit Hilfe von Wirkprinzipien zu bestimmen. Unter einem Wirkprinzip werden ein, für die Funktionserfüllung notwendiger physikalischer Effekt und prinzipielle Gestaltungsmerkmale verstanden. Die nächste Konkretisierungsstufe erfordert nähere Aussagen zu diesen Merkmalen. Unter Verwendung der Mehrkörpersysteme (MKS) kann das kinematische Verhalten der Prinziplösung untersucht werden. Hierbei wird der Platzbedarf, die Anordnung und räumliche Verträglichkeit der Komponenten geprüft. Die Untersuchung am Bauteil auftretender Beschleunigungen und daraus resultierendem Kräfte (Abbildung 4) gibt erste Anhaltspunkte zur Dimensionierung der Bauteile.

Durch Modifikationen der Simulationsmodelle können hierbei verschiedene Lösungsvarianten miteinander verglichen werden.



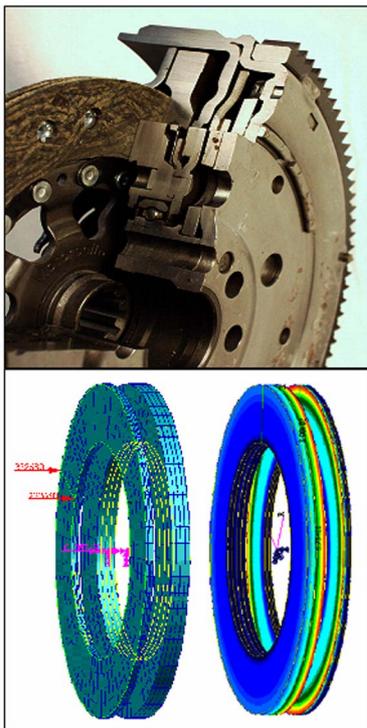


Abbildung 5:
Thermische Analyse von Kupplungen
mittels FEM

Bei ca. 90 Prozent aller Produktentwicklungen handelt es sich um Variantenkonstruktionen, die auf Vorgängermodellen basieren. Oft werden in komplexen Systemen gleiche Komponenten in unterschiedlichen Produktreihen verwendet. Ein Paradebeispiel hierfür ist die Automobilbranche. Es kann durchaus vorkommen, dass eine Kupplung in Fahrzeugmodelle mit unterschiedlicher Antriebsleitung eingebaut wird. Es gilt deshalb sicherzustellen, dass die geänderten Randbedingungen am Bauteil nicht zum Versagen führen. Abbildung 5 zeigt die Untersuchung der thermischen Beanspruchung von Kupplungsbelägen mit Hilfe der Finiten Element Methode (FEM) bei der die äußeren Randbedingungen für die Analyse im Versuch ermittelt wurden. Sie hätten jedoch mittels der MKS-Simulation auf dem virtuellen Prüfstand bestimmt werden können.

Neben der thermischen und mechanischen Eigenschaften des Bauteils kann der Einfluss einer Komponente auf das dynamische Verhalten des gesamten Systems untersucht

werden. Speziell unter dem Komfortaspekt ist das Thema von großer Bedeutung. So werden zum Beispiel Schwingungen in Antriebssträngen ihren Ursprung im Bereich des Kupplungssystems haben, durch die Kopplung der Finiten Element Methode mit der Mehrkörpersystemanalyse mit Hilfe einer Lookup-Table-Lösung [4] detektiert und durch Änderung der Friktionseigenschaften der Reibpartner (Material, Oberflächencharakteristik) eliminiert.

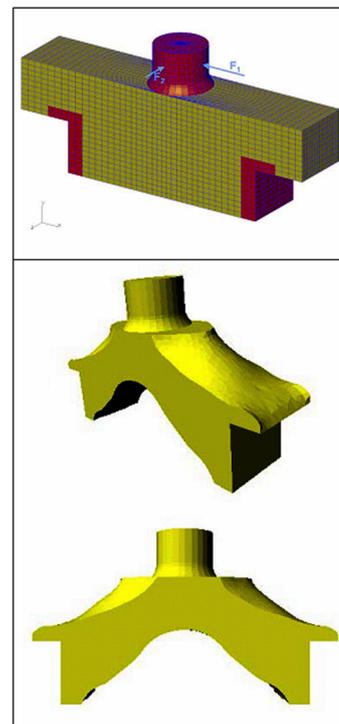
2.2 P-*Konzept: Festlegung des optimalen Designs mittels der Topologieoptimierung

Abbildung 6:
Topologiemodell (oben),
Ergebnis (unten)

Unter Topologieoptimierung versteht man eine optimale Materialverteilung im Bauteil hinsichtlich seines mechanischen Verhaltens im vordefinierten Bauraum bezüglich vorgegebener Belastungen. Ausgangspunkt für Topologieoptimierung ist im Allgemeinen ein FE-Modell, in dessen Erstellung folgende Angaben einfließen:

- der zur Verfügung stehende Bauraum
- Geometrische Randbedingungen
- Relevante Lastfälle (aus Messung oder MKS)
- Materialeigenschaften

In anschließender Definition des Optimierungsmodells werden das Designgebiet, die Zielfunktion sowie die Nebenbedingungen festgelegt. Zu den typischen Zielfunktionen in der Mechanik zählen: Minimierung des Gewichts oder der maximalen Materialbeanspruchung, bzw. Maximierung der Lebensdauer, Steifigkeit oder der ersten Eigenfrequenz. Gängige Nebenbedingungen sind: maximal zulässige Durchbiegung, maximal zulässige Materialbeanspruchung, Soll-Gewicht, -Volumen, -Steifigkeit, -Verschiebung sowie Mindest-Lebensdauer. Mit den heute verfügbaren Techniken ist es sogar möglich, schon



während der Optimierung Fertigungsaspekte wie beispielsweise Auszugsrichtung sowie minimale und maximale Strebendicken für im Gussverfahren herzustellende Bauteile zu berücksichtigen.

Eine Anwendung findet dieser Simulationsprozess in der Erstellung von Grobentwürfen. Durch eine Modifikationen der Berechnungs- und Optimierungsmodelle kann eine Designstudie durchgeführt werden. Dabei können dann sowohl geometrische Randbedingungen (z.B. Einspannstellen) als auch Nebenbedingungen der Optimierung variiert werden (z.B. Zielvolumen, Auszugsrichtungen bei Gussrestriktionen).

Abbildung 6 zeigt ein Beispiel einer Topologieoptimierung. Im oberen Bild ist das FE-Modell eines zur Verfügung stehenden Bauraums zu sehen. Die gelben Elemente stellen das sog. Designgebiet dar. Die roten Elemente werden während der Optimierung nicht berücksichtigt (frozen elements). Die angreifenden Kräfte wurden symmetrisch auf das Bauteil aufgebracht. Ziel der Optimierung war die Maximierung der Steifigkeit wobei als Nebenbedingung eine Volumenreduktion auf 70 Prozent des Ausgangsvolumens gefordert wurde. Darüber hinaus sollte das Bauteil als Gussbauteil in vorgegebenen Richtungen entformbar sein. Im unteren Teil der Abbildung ist das Ergebnis der Optimierung dargestellt. Entsprechend der Symmetrie des Problems ist der berechnete Designvorschlag ebenfalls symmetrisch. Die Materialverteilung am Bauteil entspricht dem Kraftfluss, nach dem die angreifenden Kräfte vom Zapfen des Führungselementes in die Einspannstellen geleitet werden.

2.3 P-Detaillierung

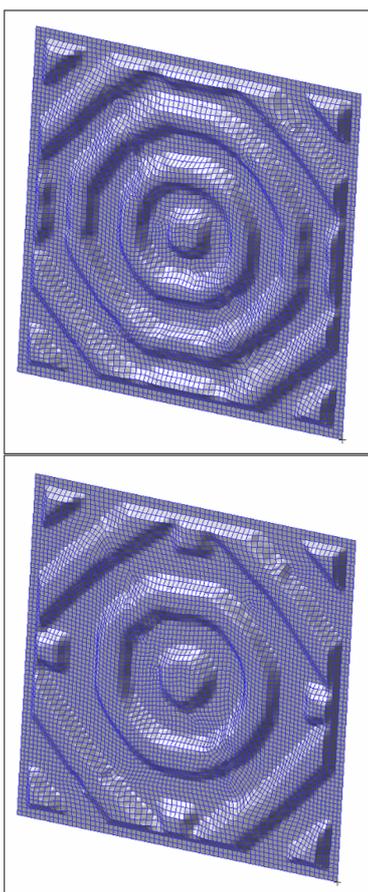


Abbildung 7: Sickenbilder [6]

oben: Sickenbreite 60mm

unten: Sickenbreite 80mm

Aufbauend auf den Ergebnissen der Konzeptphase erfolgt die Feingestaltung des Entwurfs. Abhängig vom Einsatzbereich des Bauteils stehen dem Konstrukteur mehrere Optimierungsmethoden zur Verfügung:

- **Sizing**
Optimierung der Dicke von Schalen bzw. Balkenelementen.
- **Sickenoptimierung**
Bestimmung der optimalen Form und Anordnung von Sicken in den Schalenstrukturen zur Erhöhung der Biegesteifigkeit oder Verbesserung ihrer dynamischen Eigenschaften (Abbildung 7).
- **Parameteroptimierung**
Bei der Gestaltoptimierung basierend auf Geometrieparametern wird ein CAD-System mit in den Optimierungsprozess einbezogen [5].
- **Parameterfreie Gestaltoptimierung auf Spannungen**
Zur Homogenisierung der Oberflächenspannungen an den kritischen Stellen des Bauteils werden im FE-Modell die Knoten im Bereich der Oberfläche bewegt [5].
- **Parameterfreie Gestaltoptimierung auf Betriebsfestigkeit**
Bei dynamisch beanspruchten Bauteilen in mechanischen Systemen werden das Werkstoffverhalten sowie die Last-Zeitverläufe in die Optimierung mit einbezogen. Anders als bei der Gestaltoptimierung auf Spannungen wird hier die Maximierung der Lebensdauer als Zielfunktion definiert. Dieser Simulationsprozess ist eine Kopplung aus Mehrkörperdynamik-Simulation, Finiten Element Methode, Lebensdaueranalyse sowie Gestaltoptimierung [7].

2.4 P-Validierung

In der Validierungsphase wird das fertige Produkt den Tests im Betrieb unterzogen. Heutzutage dominieren in dieser Phase experimentelle Untersuchungen. Doch auch hier finden die Simulationstools ihre Anwendung.

Im Bereich des Automobilbaus werden Fahr- und Prüfstandsversuchversuch durch die Simulation des Antriebsstrangs ergänzt. Durch die technologischen Fortschritte in der elektrischen Antriebstechnik der letzten Jahre kann mittels Echtzeitsimulation Massendynamik am Antriebsprüfstand abgebildet werden [8]. Mit Hilfe hoch dynamischer Elektromotoren wird die Momentencharakteristik und die Drehungleichförmigkeit des Verbrennungsmotors sowie der Reifenschlupf realistisch nachgebildet. An einem derartigen Prüfstand lassen sich Antriebsstrangkomponenten unter verschiedenen Konfigurationen des gesamten Antriebsstrangs untersuchen.

Durch die Anbindung von Steuergeräten an eine virtuelle Umgebung (Hardware in the Loop) lassen sich diese auf ihre fehlerfreie Funktion überprüfen. Dabei werden das komplette Fahrzeug und die Fahrstrecke in einem Mehrkörpersystem realitätsnah abgebildet. Durch die Variation der Fahrmanöver und der Fahrbahneigenschaften werden Fehler in der Software des Steuergerätes erkannt und behoben. Dadurch lässt sich die Anzahl der teuren sowie saisonbegrenzten (z.B. Fahrten auf Schnee und Eis) Fahrversuchen deutlich reduzieren.

3 ELAnO – Informationssystem¹

Im Verlauf des vom BMBF geförderten Projektes „ELAnO“² wurden durchgängige Prozesse zur Entwicklung und Konstruktion von Leichtbauprodukten mit dem Einsatz numerischer Methoden und der interdisziplinären Strukturoptimierung entwickelt. Ausgehend von der Analyse der Anforderungsprofile unterschiedlicher Industriezweige an einen wirtschaftlichen Konstruktionsprozess von Leichtbauprodukten, wurden neue Simulationsmethoden entwickelt und bestehende Simulationstools miteinander verknüpft. Die Validierung der Zusammenarbeit zwischen Produzenten, Softwarehäusern und Methodenentwicklern erfolgte an ausgewählten industriellen Produktbeispielen. Im Rahmen des Projektes wurde ein Informationssystem aufgebaut, das die im Projektverlauf gesammelten Erfahrungen sowie die Projektergebnisse der Öffentlichkeit zur Verfügung stellt. Anhand von Anwendungsbeispielen aus der Automobil-, Nutzfahrzeug- und Werkzeugmaschinenbranche wird der Anwender an folgende Standardprozeduren in der virtuellen Produktentwicklung herangeführt.

- Strukturoptimierung in Verbindung mit Mehrkörpersystemen
- Berücksichtigung von Fertigungsrandbedingungen in der Optimierung
- Gestaltoptimierung von dynamisch beanspruchten Bauteilen auf Lebensdauer
- Strukturoptimierung in Verbindung mit nichtlinearer FE-Analyse

Diese standardisierte Vorgehensweisen soll den Anwendern, die Leichtbau bisher nicht häufig angewendet haben, helfen die Hemmschwelle oder "Eintrittsbarriere" zu überwinden. Für Anwender, die Leichtbau häufiger anwenden, ist durch diese Formalisierung eine Effizienzsteigerung möglich.

Neben der Beschreibung von Simulationsprozessen stehen dem Anwender weitere Zusatzinformationen zur Verfügung. Hierzu gehört die Einführung in die Theorie der einzelnen Berechnungswerkzeuge, wie Finite Element Methode, Mehrkörpersysteme oder Optimierung. In der Kategorie „Konstruktionsmethodik“ wird die methodische Vorgehensweise bei Entwicklung eines neuen Produktes mit dem Fokus auf die Einsatzmöglichkeiten von Simulationswerkzeugen, insbesondere auf die der Strukturoptimierung, beschrieben. Zusätzlich zu den Erkenntnissen aus dem Projekt wurden auf der Plattform externe Informationsquellen: Literatur-, Linksammlung sowie Regelwerkverzeichnis zusammengetragen.

¹ <http://elanoinfo.mkl.uni-karlsruhe.de>

² <http://www.elano.org>

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Integration der Simulation in die Produktentwicklung bringt neben der gesteigerten Effizienz des Entwicklungsprozesses gewisse Risiken mit sich. Bei der Erstellung eines Simulationsmodells wird das reale System gewissen Vereinfachungen unterzogen. Aufgrund von komplexen Systemwechselwirkungen entsteht die Gefahr falscher oder nicht ausreichend genauer Modellannahmen, die wiederum für die Zuverlässigkeit der Ergebnisse eine entscheidende Rolle spielen. Deshalb können die Experimente an realen Systemen nicht vollständig durch numerische Methoden ersetzt werden. Doch eine gegenseitige Ergänzung der beiden Welten führt zur Senkung der Produktentwicklungskosten und Erhöhung der Produkt- und Entwicklungsqualität.

Die Anbindung der numerischen Methoden in die Produktentwicklung ist ein kontinuierlicher Prozess, der noch längst nicht abgeschlossen ist. Durch das Vorziehen der Lernkurve in die Konzeptphase können nach dem heutigen Stand der Technik sehr früh und zuverlässig die Eigenschaften des Bauteils bestimmt werden. Die Einbeziehung der Fertigungsaspekte in die Strukturoptimierung gewährleistet die Fertigbarkeit der Designvorschläge. Die Kopplung der Lebensdaueranalyse mit der Gestaltoptimierung ermöglicht die Berücksichtigung des Werkstoffverhaltens bei dynamischer Beanspruchung. Es gibt jedoch eine ganze Reihe an Aufgaben, die es noch zu Lösen gilt. Hierzu gehört beispielsweise die Topologieoptimierung von geregelten Systemen. Auch die Einbeziehung der Fertigungssimulation - wie z.B. das Gießen - in die Strukturoptimierung oder die Verbesserung der Zuverlässigkeit der Lebensdaueranalyse stellen weiterhin eine Herausforderung dar. All diese offenen Fragestellungen zeigen, dass sich der heutige Produktentwicklungsprozess noch nicht in einem globalen Optimum befindet.

Literatur

- [1] Fraunhofer IAO Studie 1996
- [2] Fraunhofer IAO Studie 2000
- [3] G. Rommel: „Qualität gewinnt: mit Hochleistungskultur und Kundennutzen an die Weltspitze“, McKinsey & Company, Inc., Stuttgart, Schäffer-Poeschel, 1995
- [4] A. Albers, S. Ott; L. Nowicki: „Ganzheitliche Untersuchungsmethode von friktionskontaktinduzierten Schwingungen in Antriebssträngen – Integration virtueller und experimenteller Methoden“, VDI Tagung „Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2003 - Erfahrungen, Methoden und Innovationen“, Düsseldorf, VDI-Verl., 2003
- [5] J. Sauter, B. Lauber: „Integrierte Gestalt- und Topologieoptimierung im Konstruktionsprozess“, Simulation - Das Fachmagazin für FEM, CFD und MKS, Ausgabe 1/2002
- [6] D. Emmrich, A. Albers: „Neue Ansätze zur Optimierung von Schalenstrukturen“, Symposium Simulation in der Produktentwicklung, Bremen 2003
- [7] D. Vieker, P. Häußler, A. Albers.: „Neue Konzepte für die virtuelle Produktentwicklung von Leichtbaustrukturen – Ansätze aus der Automobilzulieferindustrie“, Konstruktion, Springer VDI-Verlag, Oktober 2003, pp. 42-44
- [8] A. Albers, C. Schyr: „Augmented Reality am dynamischen Leistungsprüfstand“, in: J. Gausemeier; M. Grafe.: Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 123, Paderborn 2003

