

## **METHODISCHE KOPPLUNG VON DfX-STRATEGIEN MIT CAX- PROZESSUNTERSTÜTZUNG ZUR BEREITSTELLUNG PRAXISORIENTIERTER HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN**

*Jochen Zapf, Alexander Troll, Christina Stöber, Frank Rieg, Harald Meerkamm*

### **Zusammenfassung**

Innovative und marktgerechte Produktentwicklung ist die Grundlage für die internationale Wettbewerbsfähigkeit moderner Unternehmen. Eine solche Vorgehensweise kann aber nur zum Erfolg führen, wenn neben den Anforderungen der Märkte auch weitere Randbedingungen wie die eingesetzten Technologien, bestehende Normen und Gesetze berücksichtigt werden. Das zu entwickelnde Produkt muss hinsichtlich seiner Schwerpunktziele, typischerweise Kosten oder Qualität, strategisch definiert werden (DfX-Strategie). Aus einer gewählten DfX-Strategie, etwa Leichtbau, kann eine Gewichtung für die relevanten DfX-Kriterien (Gewicht, Strukturperformanz und Kosten) abgeleitet werden [1]. Da diese Ziele im gesamten Entwicklungsprozess beachtet werden müssen, ist eine Kopplung von DfX- und CAX-Prozessunterstützung unabdingbar.

Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wird aufgezeigt, wie die Methoden- und Werkzeugauswahl durch eine festgelegte DfX-Strategie beeinflusst werden. Anhand eines Fallbeispiels, der Substitution einer Metallkupplung mit drehelastischem Elastomerelement durch ein Kunststoffbauteil, wird die Vorgehensweise verdeutlicht. Die vorgegebene Strategie „Design for Cost“ resultiert in den stark gewichteten DfX-Aspekten Kosten-, Fertigungs- und Belastungsgerechtigkeit. Ziel ist es durch den erstellten CAX-Prozess eine optimale Umsetzung der einzelnen Gerechtheiten zu erreichen. Dies wird einerseits durch das gezielte Bereitstellen von DfX-Elementaranweisungen während der Synthesephasen verwirklicht, andererseits durch situationsabhängige Hilfestellungen in den Analysephasen. Diese beinhalten auch Änderungsanweisungen, falls eine Analyse unbefriedigende Resultate ergibt. In diesem Fall soll gezielt angegeben werden, welche Elementaranweisungen aus dem Syntheseschritt nachzuprüfen oder zu ändern sind. Notwendige Modifikationen können so schnell und effizient umgesetzt werden.

### **1 Einleitung**

Für Unternehmen, die auf den heutigen Märkten bestehen möchten, ist es notwendig, dass in der Produktentwicklung vielerlei Anforderungen, die nicht nur von Kunden und dem Markt an das Produkt gestellt werden, sondern auch von der Gesetzgebung und den eingesetzten Technologien, umgesetzt werden müssen. Aus diesen Vorgaben und der eigenen Unternehmensstrategie muss für das jeweilige Produkt ein strategischer Schwerpunkt in der Entwicklung festgelegt werden (DfX-Strategie), wie Leichtbau, Kosten oder Qualität. Aus der festgelegten DfX-Strategie lässt sich eine Gewichtung der zu beachtenden DfX-Kriterien wie beispielsweise bei Leichtbau das Gewicht, die Strukturperformanz und die Kosten ableiten, die bei der Entscheidungsfindung des Entwicklers stets Beachtung finden müssen.

Im Rahmen des vorliegenden Beitrags soll aufgezeigt werden, wie die Methoden- und Werkzeugauswahl durch die festgelegte DfX-Strategie beeinflusst werden. Dazu werden spezielle strategiebezogene DfX-Aspekte durch produkt- und prozessspezifische Einflüsse erweitert,

um DfX-Kriterien abzuleiten. Aus diesen werden DfX-spezifische Einflüsse für die Synthesewerkzeuge einerseits und prozessspezifische Analysewerkzeuge andererseits deduziert. Dabei soll die Umsetzung innerhalb des gesamten Entwicklungsprozesses aufgezeigt werden.

## 2 Problemstellung

Neben vielschichtigen Anforderungen, die vom Kunden und dem Markt gestellt werden, müssen auch die von der Gesetzgebung und den eingesetzten Technologien gestellten Einflüsse berücksichtigt werden. Aus diesen Vorgaben und der eigenen Unternehmensstrategie muss für das jeweilige Produkt ein strategischer Schwerpunkt für die Produktentwicklung festgelegt werden (DfX-Strategie). Um bei wachsendem Wettbewerbsdruck auf dem Markt bestehen zu können, ist der Einsatz von CAx-Werkzeugen in den letzten Jahren stark gestiegen. Dadurch kann der Prozessablauf beschleunigt und meist auch optimiert werden. Jedoch müssen auf Grund der Komplexität moderner Prozessketten hierfür meist mehrere CAx-Programme in Kombination eingesetzt werden. Durch die Vielzahl der einzelnen Tools ist es sehr aufwendig, die geeigneten Werkzeuge zweckdienlich miteinander zu verknüpfen. Selbst moderne Unternehmen sehen sich hier oft mit Problemen bei der Umsetzung konfrontiert.

Die bestehenden Methoden, wie die Umsetzung der einzelnen Gerechtheiten in Entwurf und Ausarbeitung mittels Elementaranweisungen und die Erstellung von CAx-Werkzeugketten für die Simulation bieten geeignete Hilfen für einzelne Bereiche des Entwicklungsprozesses. Um dem Entwickler aber durchgängig Hilfestellungen zukommen zu lassen, ist eine Kopplung zwischen der DfX- und der CAx-Prozessunterstützung unerlässlich. Dazu müssen spezielle strategiebezogene DfX-Aspekte durch produkt- und prozessspezifische Einflüsse erweitert werden, um DfX-Kriterien abzuleiten. Aus diesen werden, prozessdurchgängig, DfX-spezifische Einflüsse [2] für die Synthesewerkzeuge einerseits und prozessspezifische Analysewerkzeuge andererseits deduziert. Somit kann, basierend auf den ermittelten DfX-Kriterien eine problemspezifische Prozesskette abgeleitet werden. Mit Hilfe der ICROS-Methode (Intelligent Cross-linked Simulations [3]) werden verschiedene CAx-Werkzeuge und Methoden logisch miteinander verknüpft [4] und mit den DfX-Kriterien zu einer durchgängigen Prozesskette vervollständigt.

## 3 Methodischer Ansatz

Ziel des vorliegenden Ansatzes ist es, dem Produktentwickler Handlungsempfehlungen sowohl von DfX-Seite als auch durch CAx-Prozessunterstützung als Hilfestellung während des Produktentwicklungsprozesses zur richtigen Zeit bereitzustellen. Im Folgenden sollen die theoretischen Grundlagen für die Kopplung von DfX-Strategien mit einer CAx-Prozessunterstützung zur Bereitstellung praxisorientierter Handlungsempfehlungen dargestellt werden. Zum besseren Verständnis wird der Ansatz an dem Beispiel eines Produktentwicklungsprozesses (PEP) einer drehelastischen Kupplung dargestellt (Kapitel 4).

### 3.1 Festlegen der Entwicklungsschwerpunkte (DfX-Strategie)

Um der Entwicklungsaufgabe gerecht zu werden und das Produkt nicht an den Erfordernissen und somit auch am Markt vorbei zu entwickeln, muss zunächst eine Anforderungsliste aufgestellt werden. Nach der Anforderungsermittlung zu Beginn eines Projektes werden bestimmte Entwicklungsschwerpunkte festgelegt, die für den weiteren Verlauf der Entwicklung maßgebend sind. Bei der angestrebten Vorgehensweise muss zwischen den wesentlichen und den untergeordneten Anforderungen unterschieden werden:

- Die ersteren spiegeln die primäre Produktabsicht wider. Sie bilden die eigentliche Strategie, die durch das Produkt verfolgt wird.
- Letztere müssen zwar meist auch erfüllt werden, können jedoch bezüglich ihrer Umsetzung mit Kompromissen behaftet sein. Beispielsweise müssen allgemeine Voraussetzungen wie „Kostengerechtigkeit“ immer erfüllt sein. Jedoch kann auf Grund der gestellten Aufgabe der monetäre Aspekt eine eher zweitrangige Rolle spielen, solange die eigentliche Funktion gewährleistet ist (z.B. Raumfahrt).

In Tabelle 1 ist eine Auswahl an Beispielen für gestellte Entwicklungsaufgaben und resultierende Strategien aufgelistet.

Tabelle 1: Ableitung von DfX-Strategien ([5], [6], [7], [8])

Entwicklungsaufgabe	Anforderungen (Auswahl)	DfX-Kriterien	DfX-Strategie
<b>Drehelastische Kupplung als Wellenverbindung</b>  (z.B. Kunststoffkupplung)	Günstiger als Vorgängermodell	kostengerecht	DfCost
	Funktionserfüllung	belastungsgerecht	
	Großserie	fertigungsgerecht	
<b>Sportwagenhersteller</b>  (z.B. Radträger)	Fahrdynamik, Performance	Gewichtsreduktion	Leichtbau
	Sicherheitsrelevantes Funktionsbauteil	Strukturperformanz	
	Wirtschaftliche Fertigung	Kostenreduktion	
<b>Elektrogeräte für Senioren</b>  (z.B. Seniorenhandy)	Große Tasten, vermind. Druckstärke	haptisch bediengerecht	Altersgerecht
	Großes Display, gut lesbar beschriftet	optisch bediengerecht	
	Einfache Menüführung, reduzierter Funktionsumfang	Kognitionspsychologisch bediengerecht	
<b>WEEE-konformes Elektrogerät</b>  (z.B. PC)	Lösbare Verbindungen	demontagegerecht	Umweltgerecht
	Sortenrein trennbar	recyclinggerecht	
	Bleifrei gelötet	normgerecht	

Durch die Festlegung des Entwicklungsschwerpunktes (DfX-Strategie) können Kriterien abgeleitet werden, die maßgeblichen Einfluss auf die Entscheidungsfindung des Produktentwicklers haben. Welche Schwerpunkte ein Unternehmen wählt, ist stark von Faktoren wie Unternehmensphilosophie, Kundenwünschen und Markt abhängig. Den Primäranforderungen können die Haupt-DfX-Kriterien zugeordnet werden. Um eine Eingrenzung zu schaffen wurde die Anzahl der für eine Strategie einbezogenen Kriterien auf drei begrenzt. Beispielsweise bei der DfX-Strategie „Leichtbau“ sind die Hauptpunkte, die zu beachten sind, Gewichts-, Kostenreduktion und Strukturperformanz [9] (Tabelle 1). Während der Konstruktion sind diese Aspekte maßgebend für die Entscheidungsfindung. Die Festlegung der Hauptpunkte hat starke Auswirkungen auf Aspekte wie die Materialwahl, die Formgebung und den

Fertigungsprozess. In [1] werden die Wahl der DfX-Strategie, sowie die Ableitung der entsprechenden Kriterien näher erläutert. Die Wechselwirkungen zwischen den Kriterien können indifferent, unterstützend, gegenläufig oder widersprüchlich sein. Bei gegenläufigen oder widersprüchlichen Kriterien muss eine Gewichtung dieser über das weitere Vorgehen entscheiden. Um dem Entwickler die geeignete Prozessunterstützung zukommen zu lassen, müssen diese Kriterien identifiziert werden und als Einflussparameter bei der weiteren Gestaltung des Prozesses berücksichtigt werden.

### **3.2 Die ICROS-Methode**

Die Auswahl geeigneter Prozessketten gehört zu den grundlegenden Tätigkeiten eines Ingenieurs bei der Produktentwicklung. Je nach Komplexität der Aufgabenstellung kann das Beachten der Abhängigkeiten zueinander zu Schwierigkeiten führen. Ziel ist es, die Tätigkeiten eines Ingenieurs während des Produktentwicklungsprozesses zu unterstützen

Einen integralen Bestandteil bei dieser Herangehensweise bildet die ICROS-Methode [3], die einen effizienten Einsatz computergestützter Simulationen ermöglichen soll. Durch die intelligente Verknüpfung verschiedener CAx-Werkzeuge untereinander zu einer durchgängigen Prozesskette, können Verzögerungen und unnötige Iterationen im Produktentwicklungsprozess vermieden und somit Entwicklungszeit, sowie personeller Zeitaufwand und damit auch Kosten eingespart werden [4]. In Abhängigkeit der vorliegenden Randbedingungen sollen dem Entwickler konkrete Prozessabfolgen und situationsspezifische Handlungsempfehlungen zur Verfügung gestellt werden. Des Weiteren wird dem Konstrukteur ein unternehmensweit standardisierter Ablauf an die Hand gegeben, was Inkonsistenzen in den einzelnen Produktentwicklungsprozessen vorbeugt und Fehler vermeiden hilft.

Bei der ICROS-Methode werden die gegenseitigen Abhängigkeiten einzelner Prozessschritte untereinander untersucht, bewertet und zu vollständigen Prozessketten verknüpft. Hierbei wird der Ansatz aus [10] verfolgt, der besagt, dass die nur Merkmale eines Produktes in der Konstruktionsphase festgelegt werden können, um die gewünschten Eigenschaften herbeizuführen. Dies bedeutet für die Praxis, dass die Bauteilmerkmale, die durch Synthesewerkzeuge festgelegt werden, durch Analysewerkzeuge auf ihre Eigenschaften hin überprüft werden müssen. Des Weiteren sind Iterationen vorgesehen, um für den Fall, dass das resultierende Bauteil die geforderten Eigenschaften nicht erfüllt zu einem geeigneten Syntheseschritt zurückgesprungen wird, und nicht die gesamte Kette erneut durchlaufen werden muss. Da das Anforderungsprofil, sowie die gewählten Entwicklungsschwerpunkte des Produktes und somit der Einsatz der verwendeten Werkzeuge auch den versierten Anwender vor Herausforderungen stellt, ist eine prozesseitige Unterstützung durch DfX-Ansätze notwendig.

### **3.3 CAx-DfX-Kopplung**

Von DfX-Seite besteht eine geeignete Unterstützung in der Bereitstellung von Elementaranweisungen, wie z.B. bei Spritzguss „Materialanhäufungen vermeiden“, und von Elementarmethoden, mit denen die einzelnen Kriterien und Anforderungen beim Einsatz von CAx-Anwendungen umgesetzt werden können. Die Elementaranweisungen werden in Abhängigkeit der gewählten Kriterien (ermittelten Einflussfaktoren) bereitgestellt [2]. Als Grundlage dafür dienen Vorarbeiten, die im Rahmen des Forschungsverbundes FORFLOW entstanden sind, und in eine prototypische Software, den so genannten Prozessnavigator eingebunden werden sollen. Um diesen Sachverhalt datentechnisch handhabbar zu machen, wurde für die elektronische Verarbeitung eine Kopplung zwischen den Ansätzen erarbeitet (Bild 1).

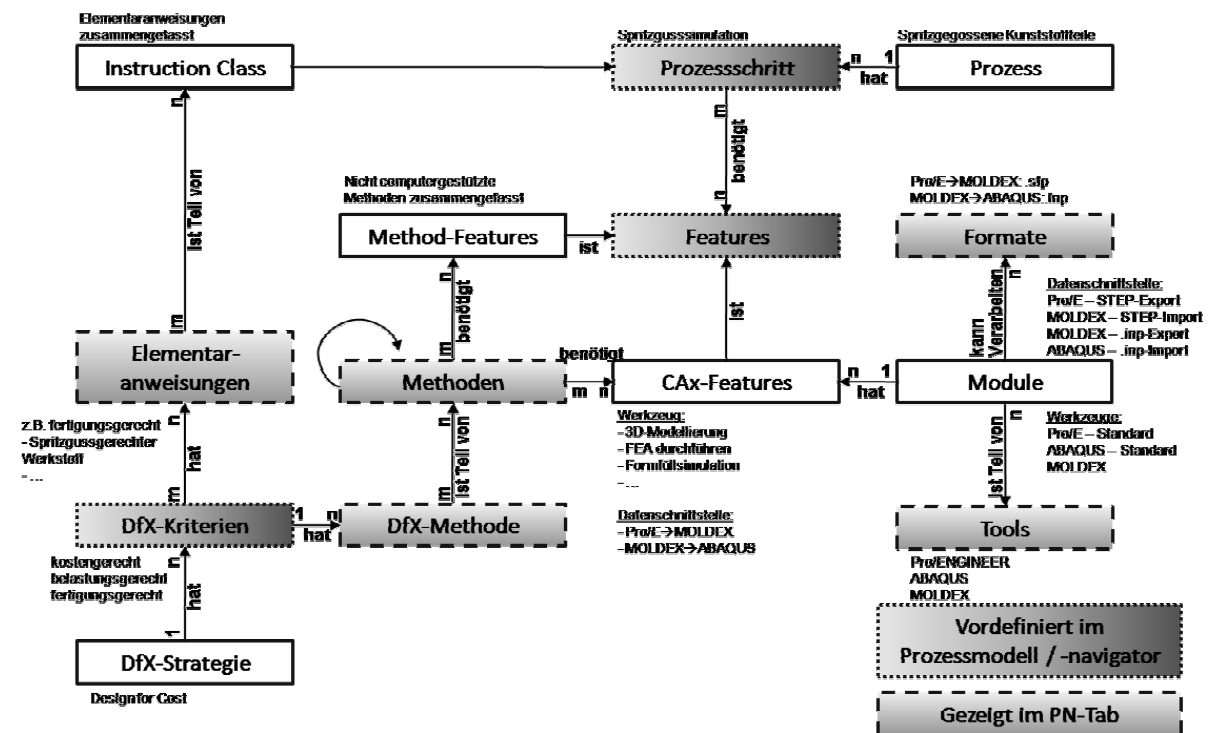


Bild 1: Konzept des Datenmodells zur CAx-DfX-Kopplung (FORFLOW)

Hier abgebildet ist exemplarisch der Prozess einer Spritzgussimulation (oben rechts). Der grundsätzliche Ansatz besteht darin, dass zur Umsetzung des Prozesses sogenannte Features, also Programmfunktionalitäten benötigt werden. Als CAx-Features werden Programmfunktionalitäten, wie „3D-Modellierung“ oder „Finite-Elemente-Analyse durchführen“ behandelt. Diese sind in Modulen von CAx-Programmen enthalten. Die Einzelschritte der Gesamtprozesskette benötigen zu ihrer Durchführung ebenfalls Features, computergestützte und methodische. Durch den Einfluss der DfX-Strategie „Design for Cost“ (unten links) in Verbindung mit dem definierten Prozess (oben rechts) werden in Abstimmung mit den hinterlegten Daten (Best-Practices, Elementaranweisungen, etc.) die Tools und die Schnittstellen zwischen den einzelnen CAx-Programmen ermittelt.

## 4 Beispielteil: Kunststoffkupplung

### 4.1 Anforderungsprofil des Bauteils

Die bisher beschriebene Vorgehensweise soll nun anhand eines konkreten Fallbeispiels, einer Wellenausgleichskupplung, belegt werden ([5], Bild 2).

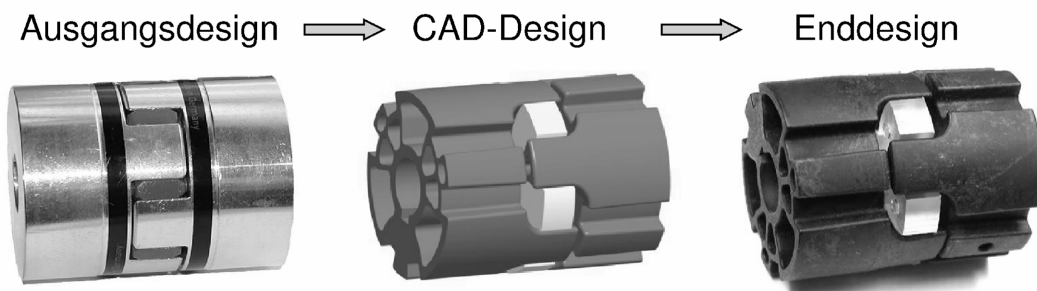


Bild 2: Entwicklung einer Kupplung aus Kunststoff

Derartige Kupplungen werden als Wellenverbindung z.B. zwischen einer Antriebsmaschine (Elektromotor, etc.) und einer angetriebenen Maschine eingesetzt. Sie können Fluchtungsfehler bei lateralen, angularen und axialen Versätzen der Wellen ausgleichen. Das ursprüngliche Bauteil wurde aus hochfestem Aluminium ausgeführt.

Es sind folgende Anforderungen an die Neukonstruktion gestellt: Sie muss bei einem Herstellungspreis von unter 7,00 € / Stück ein Drehmoment von 20 Nm innerhalb eines Temperaturbereiches von -10 °C - 90 °C übertragen können und beständig in schmiermittelhaltiger Umgebung sein. Nach dem Fertigungsprozess, welcher auf eine Großserienfertigung ausgelegt sein soll, muss es möglich sein in die Kupplung eine Passfedernut zu räumen.

## 4.2 DfX-Unterstützung

Hinter dem Anforderungsprofil aus Kapitel 4.1 verbirgt sich die DfX-Strategie „Design for Cost“. Die bezüglich der Kosten größten Einflussfaktoren sind die Fertigung und die Materialauswahl. Die zu erfüllenden Gerechtheiten hängen, wie in Kapitel 3 beschrieben eng miteinander zusammen. So entscheidet die Auswahl des Fertigungsverfahrens signifikant über die Kosten, sowohl angesichts des erforderlichen Materialeinsatzes, als auch wegen der möglichen Taktzeit der Produktion. Des Weiteren muss der Werkstoff bei einem relativ geringen Preis genügend hohe Festigkeitswerte aufweisen und sich gleichzeitig für die Herstellung in großer Stückzahl eignen.

Aus diesen Anforderungen an das Produkt lassen sich folgende Haupt-DfX-Kriterien extrapolieren (Bild 3):

1. Kostengerechtigkeit
2. Belastungsgerechtigkeit
3. Fertigungsgerechtigkeit

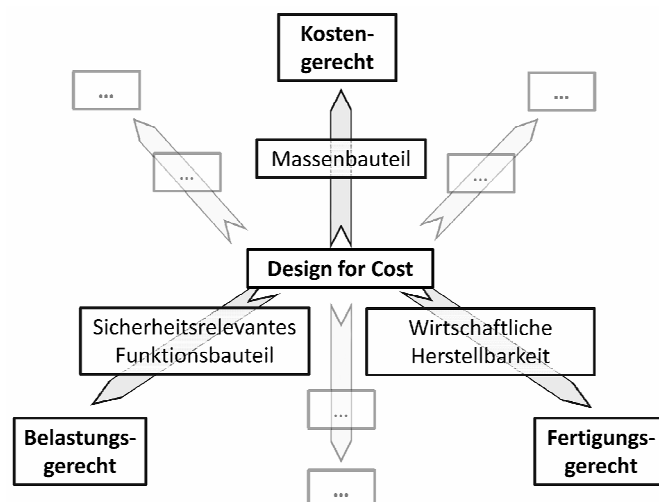


Bild 3: DfX-Strategie Design for Cost

Hierbei resultiert die „Kostengerechtigkeit“ direkt aus der gewählten Strategie. Auf Grund des engen Kostenrahmens soll das Ausgangsmaterial Aluminium durch einen Kunststoff substituiert werden.

Eine genauere Spezifikation des Kunststoffes ist über das DfX-Kriterium „belastungsgerecht“ möglich. Da das Bauteil o.g. Anforderungen unter gewissen Umgebungsbedingungen, wie

Temperatur- und Schmiermitteleinfluss, erfüllen muss, kommen als Konstruktionswerkstoff nur entsprechend beständige und belastbare Kunststoffe in Frage, wie z.B. faserverstärkte Thermoplaste.

Des Weiteren geht die „Fertigungsgerechtigkeit“ in die Werkstoffwahl mit ein, da für die Massenfertigung von Kunststoffbauteilen nur Extrusion und Spritzguss relevant sind. Daher ist ein für diese Verfahren geeigneter Kunststoff zu wählen.

Auf Grund des vorliegenden Anforderungsprofils wird als Material ein langglasfaserverstärktes Polyamid (PA66 LGF) eingesetzt. Dieser Kunststoff weist eine hohe Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit auf und besitzt eine gute Chemikalienbeständigkeit, Verarbeitbarkeit und einen angemessenen Rohstoffpreis. Bei dieser getroffenen Auswahl von Material und Fertigungsverfahren sind unter anderem folgende Elementaranweisungen zu beachten [11]:

- „Wegen Gefahr der Lunkerbildung sind starke Wanddickenunterschiede zu vermeiden.“
- „Scharfkantige Kanten und Ecken vermeiden.“
- „Bohrungen und Vertiefungen im rechten Winkel zu den Verstärkungsfasern anordnen.“

Durch diese Erweiterung der strategiebezogenen DfX-Kriterien durch produkt- und prozessspezifische Einflüsse können Informationen bezüglich der für die Produktentwicklung erforderlichen Prozessschritte abgeleitet werden.

### 4.3 CAx-Werkzeugkette

Zur Umsetzung der erweiterten Anforderungen aus Kapitel 4.2 muss eine entsprechende CAx-Werkzeugkette erstellt werden (Bild 4), aus welcher Synthesewerkzeuge einerseits und Analysewerkzeuge andererseits deduziert werden können.

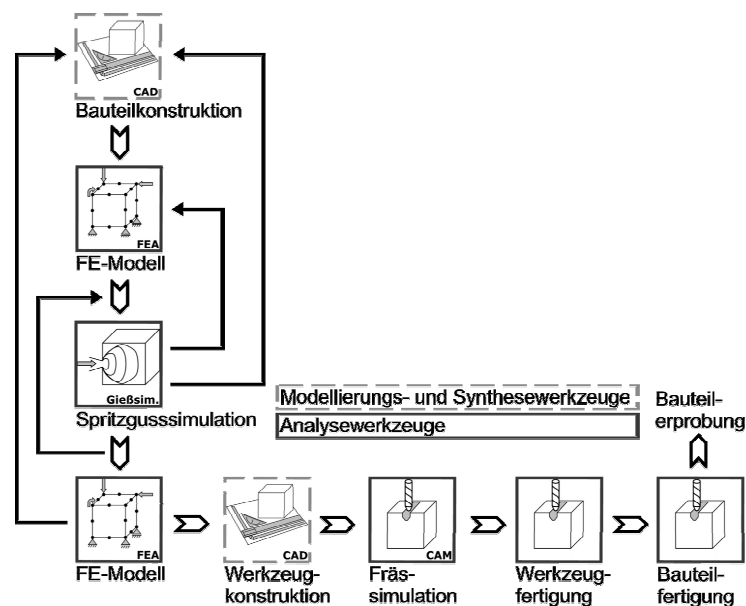


Bild 4: Prozesskette Kunststoffspritzgussteile

Zunächst wird das ursprüngliche CAD-Modell mittels einer Finite-Elemente-Analyse (FEA) auf seine Belastungen hin untersucht, bevor eine für den Kunststoff angepasste Neukon-

struktion erfolgen kann. Hierfür ist ein geeignetes CAD-System erforderlich. (Auf Grund der Tatsache, dass eine anfängliche FEA nicht bei jeder Kunststoffkonstruktion erforderlich ist, wurde dieser Schritt in Bild 4 nicht aufgeführt, um einen größeren Gültigkeitsbereich abzudecken.)

Um die auftretenden Belastungen der neuen Struktur zu ermitteln und abzusichern ist eine (weitere) FEA nötig. Erste Vorabschätzungen können hierbei meist noch durch ein, in das zur Konstruktion verwendete CAD-Programm integriertes FE-Modul abgedeckt werden. An dieser Stelle ist nur eine vorläufige Auslegung möglich, da vor der Füllsimulation nur mit noch nicht auf dieses Bauteil abgestimmten Materialdaten gerechnet werden kann.

Die Kosten- und Fertigungsgerechtigkeit führt in Verbindung mit der Materialauswahl zu einer Kunststoffmassenfertigung. Um ein auf Grund der auftretenden Belastungen entsprechend massives Kunststoffteil herzustellen, kommen Spritzguss oder Extrusion in Frage. In beiden Fällen muss eine Gussform erstellt werden. Um den richtigen Angusspunkt, eine fehlerfreie Formfüllung, etc. zu gewährleisten, muss eine Füllsimulation durchgeführt werden. Hierbei werden die inhomogenen Materialeigenschaften samt Faserausrichtung des Bauteils ermittelt (Bild 5).

Zur Validierung der endgültigen Bauteileigenschaften empfiehlt sich bei einer nun folgenden FEA mit den realitätsnäheren Materialwerten ein eigenständiges FE-Programm, da dieses meist einen höheren Funktionsumfang als integrierte aufweist, wie z.B. nichtlineare Berechnung oder das Einbinden verschiedener Fließgesetze aufweist.

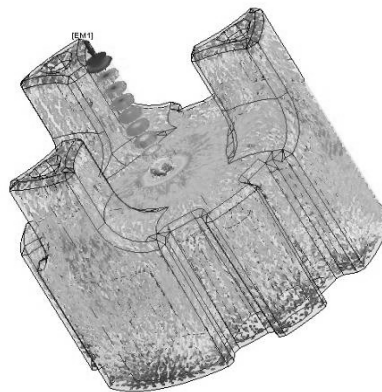


Bild 5: Faserausrichtung bei Füllsimulation [5]

Das zur Herstellung erforderliche Gusswerkzeug wird mittels eines CAD-Systems erstellt und durch eine CAM-Simulation (Computer Aided Manufacturing) auf seine Herstellbarkeit überprüft.

#### 4.4 CAx-DfX-Kopplung

Bei der Umsetzung der CAx-Kette jedoch sind unter anderem Kenntnisse über die Eigenschaften und Verarbeitung der Formmasse wichtig, um ein qualitativ hochwertiges Kunststoffbauteil zu erhalten. Zum Beispiel ist aufgrund des Wärmeausdehnungs-koeffizienten von Kunststoffen zu beachten, dass diese Bauteile beim Erkalten eine gewisse Schwindung und durch eventuelle Eigenspannungen im Bauteil Verzug aufweisen können, womit bestimmte Toleranzklassen der Maßhaltigkeit nicht erreicht werden können [11]. Aus dem beschriebenen Sachverhalt lassen sich Einflussfaktoren wie „PA 66“, „glasfaser-verstärkt“, „Schwindung“, etc. ableiten, und entsprechende Elementaranweisungen angeben (vgl. Kapitel 4.2).



An entsprechender Stelle in der CAx-Werkzeugkette eingefügt können die DfX- Hilfestellungen also dem Anwender die notwendigen, bei der Synthese erforderlichen Anweisungen erteilen, um unnötige Iterationen zu vermeiden und den gesamten Prozess zu beschleunigen. Sollte das resultierende Produkt den gestellten Anforderungen nicht entsprechen, so werden bei einer gezielten Iteration geänderte Elementaranweisungen angegeben. Der Schlüssel liegt hierbei auch in einer hinreichenden Dokumentation damit Verbesserungspotentiale im Folgezyklus überarbeitet werden können. Um diese Gegebenheiten optimal umsetzen zu können, ist der kombinierte Einsatz beider Methoden erforderlich.

## 5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch die Kopplung von CAx-Werkzeugketten mit der DfX-Unterstützung konnten beim vorliegenden Anwendungsbeispiel die Vorgaben vollständig erfüllt werden. Die konsequente Anwendung dieses Prinzips kann zur frühzeitigen Erkennung möglicher konstruktiver Fehler führen (Analysewerkzeuge) und entsprechende Maßnahmen können bei den Synthesewerkzeugen früh im Konstruktionsprozess umgesetzt werden. Das hier entstandene Bauteil ist um 62% leichter als das ursprüngliche, bei einer gleichzeitig um 215% gestiegenen Belastbarkeit und einem Preis von unter 7,00 € pro Kupplungspaar.

Durch die proaktive Verknüpfung der ICROS-Methode mit den DfX-Strategien wurde eine Effizienzsteigerung beider Verfahren erreicht. Weitere Untersuchungen hierzu werden im Rahmen des Forschungsverbundes FORFLOW durchgeführt.

## 6 Literatur

- [1] Bauer, S.: Design for X–Ansätze zur Definition und Strukturierung, In: Design for X, Beiträge zum 14. Symposium, Neukirchen, 13. und 14. Oktober 2003, Hrsg.: Meerkamm, H., Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen: 2003, S. 1-8
- [2] Faerber, M.; Jochaud, F.; Stöber, C.; Jablonski, S.; Meerkamm, H.: Knowledge oriented process management for DfX. In: Proceedings of the Design 2008, Dubrovnik, 2008
- [3] Alber, B.; Hackenschmidt, R.; Dolsak, B.; Rieg, F.: ICROS-The Selective Approach To High-Tech Polymer Product Design-Modelling And Experimental Verification. In: Proceedings of the Design 2006, Dubrovnik, 2006
- [4] Troll, A.; Dörnhöfer, A.; Goering, J.-U.; Rieg, F.: Ansätze zur Beschleunigung der Produktentwicklung durch intelligente Verknüpfung von Simulationen. In: Design for X – Beiträge zum 18. Symposium, Erlangen, o.V., 2007
- [5] Alber-Laukant, B.: Struktur- und Prozesssimulation zur Bauteildimensionierung mit thermoplastischen Kunststoffen: Validierung von Werkstoffbeschreibungen für den technischen Einsatz. Fortschritte in Konstruktion und Produktion, Band 10, Diss. Universität Bayreuth, 2008
- [6] Dörnhöfer, A.: Leichtbau mit partikelverstärkten Magnesiumlegierungen – Integration von virtueller Werkstoffentwicklung und Topologieoptimierung in den Produktentwicklungsprozess. Fortschritte in Konstruktion und Produktion, Band 11, Diss. Universität Bayreuth, 2008
- [7] Paetzold, K., Erzigkeit, H.: Berücksichtigung von demenziellen Syndromen bei der Gestaltung von kognitiven technischen Systemen für Senioren. In: Design for X – Beiträge zum 18. Symposium, Erlangen, 2007
- [8] Steinhilper, R.; Hudelmaier, U.: Erfolgreiches Produktrecycling zur erneuten Verwertung oder Verwendung: Ein Leitfaden für Unternehmen. RKW, Eschenborn, 1993

- [9] Schumacher, A.: Optimierung mechanischer Strukturen, Grundlagen und industrielle Anwendungen, Springer Berlin Heidelberg, 2005
- [10] 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
- [11] Bode, E.: Konstruktionsatlas, 6. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig: 1996

Dipl.-Ing. Jochen Zapf  
Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD  
FAN – Universität Bayreuth  
Universitätsstr. 30, D-95447 Bayreuth  
Tel: +49-921-55-7224  
Fax: +49-921-55-7195  
Email: [jochen.zapf@uni-bayreuth.de](mailto:jochen.zapf@uni-bayreuth.de)  
URL: <http://cad.uni-bayreuth.de>

Dipl.-Ing. Christina Stöber  
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
FAU Erlangen-Nürnberg  
Martensstraße 9, D-91058 Erlangen  
Tel: +49-9131-85-23216  
Fax: +49-9131-85-27988  
Email: [stoeber@mfk.uni-erlangen.de](mailto:stoeber@mfk.uni-erlangen.de)  
URL: <http://www.mfk.uni-erlangen.de>