

# Computergestützte Multiebenen-Simulationen zur optimierten Auslegung von CFK-Bauteilen

Jochen Zapf und Frank Rieg  
*Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD  
Universität Bayreuth*

Carbon fiber reinforced plastics are well suitable for lightweight constructions due to their mechanical properties (high Young's modulus and stiffness) and their low specific weight compared to classic design materials. Possible applications open up for use in e.g. aircraft, racing vehicles and supporting systems. With the help of modern computer-aided calculation methods (CAx-tools) potentials, and thus stability, durability and ultimately the cost can be positively affected. This contribution will explain a methodological multi-level approach on the efficient application and combination of Finite Element Methods used for carbon fiber reinforced structures.

## 1 Einleitung

Einen erheblichen Anteil bei Produktinnovationen bilden die Entwicklung und vor allem die Anwendung neuer Werkstoffe. Durch deren anwendungsgerechten Einsatz können bei Bauteilen zusätzliche Optimierungspotentiale genutzt werden.

Kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK) beispielsweise eignen sich auf Grund ihrer mechanischen Eigenschaften (hoher E-Modul, hohe Steifigkeit) bei vergleichsweise geringer Dichte gut für Leichtbaukonstruktionen. Das Leichtbaupotential dieser Werkstoffklasse ist damit auch die Triebkraft für die

---

Verbreitung von CFK-Werkstoffen in vielen Industriezweigen, um mit leistungsfähigen Produkten Marktanteile zu erwirtschaften. Mögliche Anwendungen erschließen sich beim Einsatz in z.B. in Flugzeugen, Rennfahrzeugen und Tragsystemen.

Jedoch ist der Einsatz dieser Werkstoffe mit neuen Herausforderungen verknüpft, da deren komplexes Materialverhalten oft nur mit Hilfe moderner computergestützter Berechnungsmethoden vorhergesagt werden kann.

## 2 Problemstellung

Mit Hilfe geeigneter computergestützter Verfahren kann die Haltbarkeit mechanischer Bauteile abgesichert werden. Für die Stabilität kohlefaserverstärkter Bauteile ist in erster Linie der belastungsgerechte Lageraufbau der Gesamtstruktur [1] entscheidend. Um Optimierungspotentiale hinsichtlich Stabilität, Haltbarkeit und letztlich der Kosten aufzudecken und umzusetzen, wird hierfür die Finite-Elemente-Analyse (FEA) verwendet.

Jedoch sind derartige Simulationsmodelle oft sehr aufwendig bezüglich Modellaufbau und Berechnungszeit. Vielversprechende Varianten können oft nur nach längerer Lösungssuche ermittelt werden, wenn schon ein erheblicher Zeitaufwand (personell wie maschinell) in ein entsprechend genaues Simulationsmodell investiert wurde.

## 3 Multiebenen-Simulation

Um dieser Herausforderung zu begegnen, verfolgt der vorliegende Beitrag eine Absicherung des Produktes auf mehreren hierarchischen Ebenen. Eine Dekomposition des Gesamtsystems in seine Subsysteme bis hin zu einzelnen Funktionsträgern ermöglicht eine umfassendere Betrachtung und Simulation des Produktes. Die vorgestellte Methode fußt auf einem kombinierten Top-Down und Bottom-up Ansatz in Anlehnung an das V-Modell der Produktentwicklung bzw. das FORFLOW-Prozessmodell [2, 3, 4].

Ziel ist eine Reduktion des Berechnungsaufwandes durch Eingrenzung der möglichen Simulationsmodellvarianten. Hierzu werden Simulationen auf verschiedenen Abstraktions- und Detaillierungsebenen des Gesamtmodells durchgeführt. Hiermit wird die Absicht verfolgt, von einzelnen Funktionsmechanismen der FEA zu detaillierten Gesamtmodellen zu gelangen unter gleichzeitiger Reduktion von Iterationen. Dieses Vorgehen soll anhand eines CFK-Bauteiles erörtert werden. Es handelt sich dabei um einen Teleskopmast, welcher aus kohlefaserverstärkten Rohren mit Anbauteilen aus Stahl und

Aluminium aufgebaut ist. Dieser Mast wird beim Aus- und Einfahren mit Drehmoment sowie im Betrieb mit Gewichts- und Windlasten beaufschlagt.

### 3.1 Prozesskette

Zunächst ist eine adäquate Prozesskette in Abhängigkeit von Art und Umfang der Entwicklungsaufgabe zu erstellen. Hierbei können Wechselwirkungen der jeweiligen Programme untereinander Probleme bei der Durchführung der Simulationen verursachen. Um einen effizienten Einsatz computergestützter Werkzeuge zu gewährleisten, wird die ICROS-Methode (Intelligent CROSS-linked Simulations) eingesetzt, die den Entwickler bei seiner Arbeit unterstützen soll [5].

Mit dem ICROS-Prinzip werden die wechselseitigen Einflüsse von CAx-Anwendungen untereinander berücksichtigt und zu einzelnen Prozessschritten zugeordnet, welche anschließend zu Prozessketten verknüpft werden. Hierbei wird die Merkmals-Eigenschafts-Kopplung nach Weber/Werner zu Grunde gelegt [6] und durch Einbringen von gezielten Iterationen ergänzt. Auf diese Weise kann zu einem geeigneten Syntheseschritt zurückgesprungen werden, falls das System die geforderten Eigenschaften nicht erfüllt, ohne die gesamte Entwicklungskette erneut durchlaufen zu müssen. Das beschriebene Vorgehen kann in einer vereinfachten Design Structure Matrix abgebildet werden (Abbildung 1) [7]:

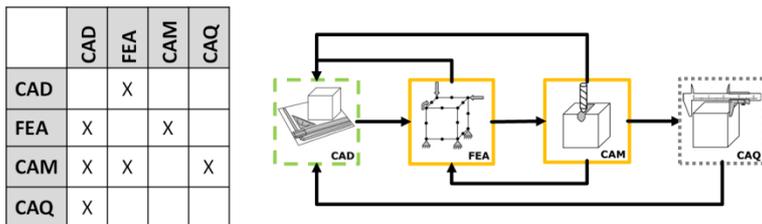


Abbildung 1: Vereinfachte CAx-Prozesskette

Den aufwendigsten Schritt der Produktverifizierung bilden hierbei die Finite Elemente Analysen, welche üblicherweise einen hohen Zeitaufwand nach sich ziehen. Im folgenden Abschnitt wird ein Mehrebenenansatz erläutert, mit dem dieser Zeitbedarf reduziert werden soll.

### 3.2 Einflussparameter

Je nach Anwendungsfall (Konstruktion, Belastungsarten, etc.) sind hierbei verschiedene Einzelaspekte zu berücksichtigen. Die jeweiligen Zuordnungen werden mit Hilfe von Domain Mapping Matrices dargestellt, welche parallel zur Design Structure Matrix für die jeweiligen Simulationstypen aufgestellt werden [7]: Die Zeilen repräsentieren hierbei den Einzelfall (Bauteil bzw. dessen Konstruktionsweise), die Spalten die benötigten Daten und Programmfunktionen (Abbildung 2).

Hauptfkt.- träger	Material						Belastung				...		
	isotrop		orthotrop		anisotrop		Zug / Druck	Biegung	Torsion	...	statisch	dynamisch	...
	Stahl	Aluminium	CFK	GFK	Faserverstärkung	Partikelvermischung							
Teil 1			X				X		X				
Teil 2	X							X	X				
...													

Abbildung 2: Domain Mapping Matrix für die Hauptfunktionsträger eines Systems

Hierbei gilt es nach aufbau- und simulationsspezifischen Aspekten zu unterscheiden. Erstere umfassen im Wesentlichen die Größe des Gesamtsystems (Einzelteile), Zerlegbarkeit in Subsysteme sowie deren Einteilung in Haupt- und Nebenfunktionsträger. Unter die simulationsspezifischen Aspekte fallen Materialeigenschaften, Randbedingungen und Belastungsfälle. Auf Grund ihres quasi-generischen Charakters eignen sich hierfür die Mikroebenen am besten (Abbildung 3).

Für das beschriebene Beispielteil erfolgt zunächst eine virtuelle Zerlegung des Gesamtsystems in Subbaugruppen, in diesem Fall einzelne CFK-Rohre mit den metallischen Anbauteilen. Auf Grund des Modellaufbaus mit einem CFK-Teil als zentralem Bauteil sowie der Materialkombination (Stahl-CFK) ergeben sich folgende Abhängigkeiten: Da die mechanische Stabilität von CFK-Bauteilen in erster Linie vom Aufbau der einzelnen Lagen abhängt, ist es zunächst erforderlich diesen auf Mikroebene zu simulieren. Etwaige Anbauteile (Führungsschienen, Flansche, etc.) sowie deren Befestigung (Kleberverbindungen, Schrauben) können dann mit dem ermittelten, optimierten Lagenaufbau

in Mesomodellen berechnet werden, bevor deren Ergebnisse in das Makromodell einfließen.

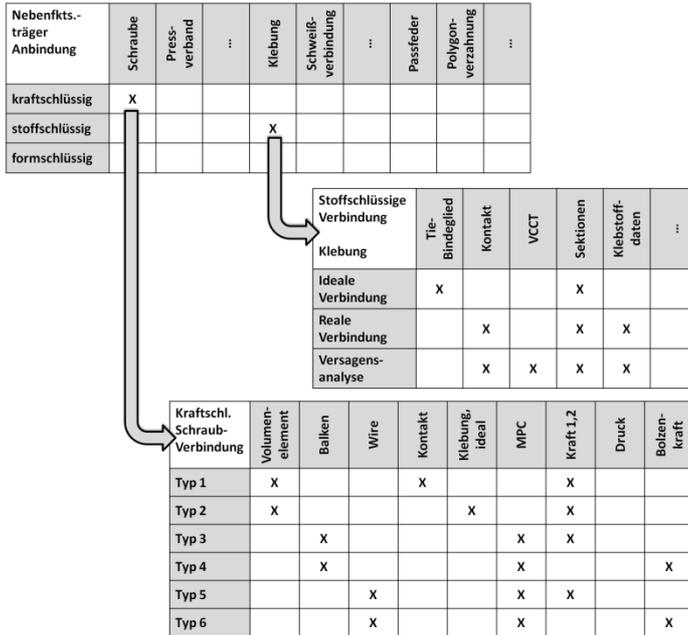


Abbildung 3: Simulationsspezifische Aspekte der Nebenfunktionsträger (exemplarischer Aufbau)

Die Ablage der Simulationen (hauptsächlich aus den Mikromodellen) in einer Datenbank, welche über die eben beschriebenen Parameter verknüpft ist, bietet die Möglichkeit, mit steigender Anzahl an Projekten ein umfangreiches Hilfsmodul zur Anwendung der CAx-Werkzeuge zu erstellen [9]. Maßnahmen zur Verbreitung und Akzeptanz im Benutzerkreis sollen im Zuge dieses Artikels jedoch nicht diskutiert werden.

### 3.3 Ebenendefinition

Auf Basis der ermittelten Einflussparameter ist nun eine Aussage über den erforderlichen Ebenenaufbau möglich [10]. Das Gesamtsystem wird bis auf einzelne funktionale Einheiten heruntergebrochen, so dass eine stufenweise Validierung der geforderten Eigenschaften erfolgen kann. Die Ebenenhierarchie gliedert sich dabei in Simulationen einzelner Bauteile auf Mikro- sowie auf Meso-Ebene, deren Ergebnisse in ein Makro-Modell einfließen [8]. Die

vierversprechensten Varianten können dann jeweils eine Ebene höher in rechenaufwendigeren Simulationsmodellen umgesetzt und bewertet werden. Erst auf der obersten Ebene wird ein genügend detailliertes Simulationsmodell des gesamten Prototypen erstellt und berechnet (Abbildung 4).

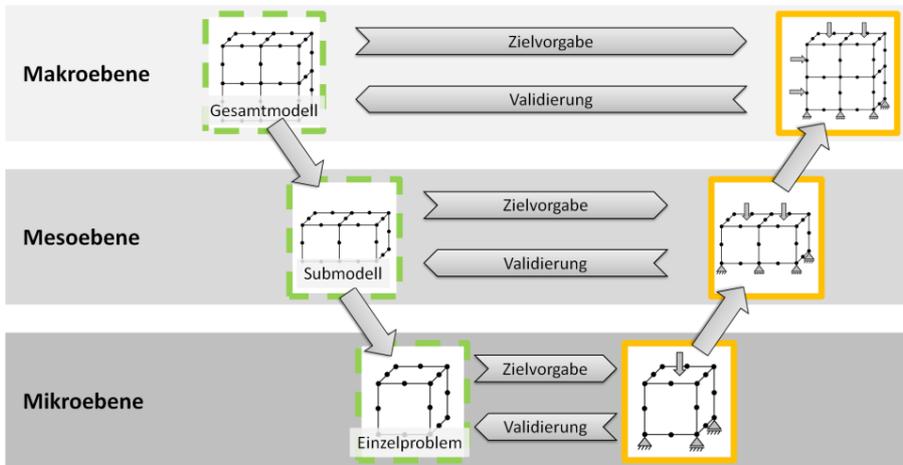


Abbildung 4: Mehrebenen-Ansatz

Die *Mikroebene* repräsentiert einzelne Funktionseinheiten und -mechanismen, welche in relativ überschaubaren und vereinfachten Modellen simuliert und bewertet werden können. Das grundsätzliche Augenmerk liegt hierbei auf den jeweiligen Simulationsvariationen wie z.B. Lagenaufbau oder auch Simulationsmechanismen, wie beispielsweise Schraubensimulation durch aufwendige Volumenbauteile oder vereinfachte Balkenelemente. Diese Ebene bietet den Vorteil, dass die Vorgehensweisen in diesem Stadium noch relativ allgemein gehalten werden können. Somit kann eine generische Datenbank angelegt werden, mit der für bestimmte Simulationsarten Wiederverwendungspotentiale erschlossen werden können. Eine eindeutige Zuordnung erfolgt mit Hilfe einer Domain Mapping Matrix (vgl. Kapitel 3.2) [7].

Für den CFK-Mast werden auf dieser Stufe in erster Linie verschiedene Varianten des Lagenaufbaus simuliert, um ein Optimum zwischen Stabilität und Kosten zu ermitteln (Abbildung 5) [4]. Dieser struktur- und lastfallabhängige Aufbau wird für das Mesomodell übernommen.

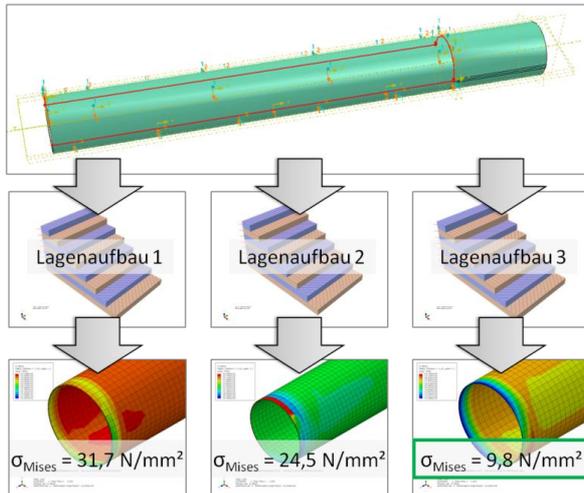


Abbildung 5: Mikroebene zur Ermittlung des lastgerechten Lagenaufbaus

Auf der *Mesoebene* werden die ausgewählten Prinzipien aus dem Mikromodell eingebunden und in Zusammenwirkung mit einzelnen Subsystemen untersucht. Demnach können Mesomodelle für kleinere Bauteile auch entfallen, wenn auf Grund der geringen Anzahl von Einzelkomponenten eine weitere Zerlegung nicht möglich ist.

Die Betrachtungen für das Beispielpiece werden auf dieser Ebene zusätzlich um die Anbindung von Anbauteilen erweitert, indem z.B. etwaige Harznuten und Klebeschichten (im Rahmen der verfügbaren Daten) abgebildet und simuliert werden (Abbildung 6).

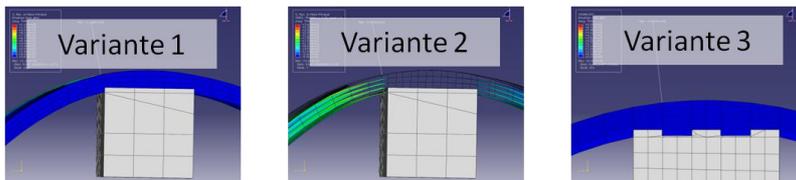


Abbildung 6: Mesoebene zur Anbindung der Anbauteile

Ergebnisse dieses Mesomodells sind der Aufbau und die Anbindung der Führungsschienen der Einzelrohre. Den konkret auftretenden Belastungen hält die verwendete Klebeschicht stand, so dass für das Makromodell eine

vereinfachte ideale Klebung verwendet werden kann, wodurch sich sowohl Zeit für Modellausbau wie auch für dessen Berechnung reduzieren lässt.

Bei Simulation auf *Makroebene* werden die gewonnenen Erkenntnisse aus den untergeordneten Modellen verarbeitet. Bei diesem aufwendigsten der Modelle können durch die „AusSORTIERUNG“ auf den unteren beiden Hierarchiestufen gezielt die geeignetsten Simulationselemente verwendet werden. Somit reduziert sich der zeitliche Aufwand für den Aufbau des Berechnungsmodells sowie für etwaige Iterationen / Nacharbeiten. Zusätzlich müssen die Zielvorgaben für jede Ebene geklärt werden, so dass eine gezielte Validierung einzelner Punkte ermöglicht wird. Bereits abgesicherte Erkenntnisse können dann direkt in die Validierung des Gesamtmodells einfließen.

Das Makromodell des Mastsystems schließlich umfasst alle relevanten Teile des Rohrsystems mit den gewonnenen Erkenntnissen (u.A. optimaler Lagenaufbau) und angenommenen Idealisierungen (z.B. Klebung, Schaubanbindungen, etc.) der einzelnen Submodelle. Durch Ergebnisse aus den Mikro- und Mesomodellen ist es damit möglich, eine Aussage über die Hauptfunktionsträger und hochbelasteten Teile zu treffen (Abbildung 7).

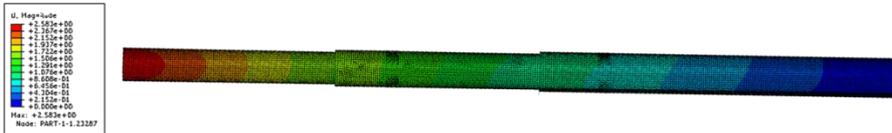


Abbildung 7: Simulation des gesamten Mastes auf Makroebene [11]

Die gezeigte Auswahl stellt jedoch auf Grund der Produktkomplexität nur einen Teil der möglichen Ebenen dar. Aus einer Dokumentation des Vorgehens müssen schließlich generische Best-Practice-Dokumente abgeleitet werden. Diese erschließen Wiederverwendungspotentiale für Folgeprojekte.

### 3.4 Ergebnis

Durch einen gezielten Lagenaufbau wurde eine gleichmäßige und unkritische Spannungsverteilung über die Rohrwandung erreicht, womit ausgewählte Modellvarianten der CFK-Rohre den geforderten Belastungen standhalten. Der Einsatz der CFK-Werkstoffe und einer angepassten Verarbeitung sollte vor allem eine Kosten- und Gewichtsreduktion pro Bauteil erzielen. Ein Vergleich

zwischen einem entsprechend bearbeiteten Rohrsystem aus Aluminium und der möglichen Neuentwicklung aus CFK wird in Tabelle 1 dargestellt:

Tabelle 1: Potentiale der CFK-Rohr-Neuentwicklung [11]

<b>Material</b>	<b>Aluminium</b>	<b>CFK</b>	<b>CFK</b>
<b>Wandstärke [mm]</b>	5	4	5
<b>Bauteilgewicht [kg]</b>	15,6	6,9	8,7
<b>Fertigungskosten [€]</b>	ca. 1600	820	920

#### 4 Zusammenfassung

Durch ein stufenweise detaillierteres Vorgehen können für die Bearbeitungs- und die Berechnungszeiten computergestützter Simulationsmethoden erheblich Zeitvorteile erreicht werden. Der leicht gestiegene Initialaufwand beim Erstellen der Modelle für die drei Simulationsebenen wird durch eine Zeitreduzierung beim Änderungsmanagement wieder aufgewogen. Gezielte Simulationen auf mehreren Detaillierungsstufen können ferner dazu beitragen, in der Praxis unnötige Iterationen zu vermeiden, da etwaige Probleme bereits auf den niederen Ebenen bereinigt werden können. Die methodische Verknüpfung von CAx-Werkzeugen (ICROS-Methode) in Verbindung mit dem Mehrebenenansatz hilft Entwicklungsbrüchen vorzubeugen und Fehler frühzeitig zu vermeiden. Somit wird eine Nacharbeit bei den aufwendigeren Gesamtmodellen deutlich verringert. Eine auf diese Weise verbesserte Planbarkeit trägt dazu bei, die Wirtschaftlichkeit im Produktentwicklungsprozess zu verbessern.

#### Literatur

- [1] Ehrenstein, G.: „Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften“, Carl-Hanser-Verlag, 2. Auflage, München Wien, 2006.
- [2] Krehmer, H.; Eckstein, R.; Lauer, W.; Roelofsen, J.; Stöber, C.; Troll, A.; Zapf, J.; Weber, N.; Meerkamm, H.; Henrich, A.; Jablonski, S.; Lindemann, U.; Rieg, F.; Wartzack, S.: „Das FORFLOW-Prozessmodell zur Unterstützung der multidisziplinären Produktentwicklung“. In: Konstruktion, Ausgabe10, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2010.
- [3] VDI-Richtlinie 2221: „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“. VDI-Handbuch Konstruktion, Berlin. Beuth Verlag GmbH Berlin Düsseldorf, 1993.

- 
- [4] Pahl, G; Beitz, W. et al.: "Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen", Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [5] 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. Materialpruefung, Carl Hanser Verlag, Volume 49, pp. 402-407, 2007.
- [6] 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.
- [7] Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: „Structural Complexity Management“. Springer Verlag, Berlin 2009.
- [8] Zapf, J.; Alber-Laukant, B.; Rieg, F.: „Customized design processes of polymer parts by computer-aided tools“. In: International Design Conference DESIGN 2010, Dubrovnik - Croatia, 2010.
- [9] Vajna, S. et al.: „CAx für Ingenieure“, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2009.
- [10] o.V.: „Analysis of Composite Materials with Abaqus“. In: Vertiefungsseminar - Faserverbundstrukturen mit Abaqus, München, 2010.
- [11] Remer, H.: „Konstruktive und rechnergestützte Auslegung von Faserverbundbauteilen am Beispiel einer zylindrischen Struktur“. unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Bayreuth, Bayreuth, 2010.