

# Integration von Berechnungen in den frühen Entwurfsprozeß

Dipl.-Ing. Christoph Heynen

## 1 Einleitung

Der Konstruktionsprozeß ist bis zur endgültigen Lösungsfindung bekanntlich durch eine Vielzahl von Iterationszyklen gekennzeichnet. Insbesondere bei der stofflich-geometrischen Gestaltgebung zeigt sich ein durch starke Abhängigkeiten geprägtes Wechselspiel von gestalterischen und rechnerischen Tätigkeiten.

Um zu kürzeren Produktentwicklungszeiten zu gelangen, ist es daher sinnvoll, solche iterativen Abläufe sowohl in ihrer Anzahl zu verringern als auch hinsichtlich ihrer Länge in bezug auf die betroffenen Konstruktionsphasen möglichst kurz zu halten. Je weiter die Phasen des Entstehens und Behebens eines Fehlers im Konstruktionsprozeß auseinanderliegen, desto größer ist der erforderliche Änderungsaufwand. Wird eine notwendige Modifikation der Bauteilgrobgestalt beispielsweise erst in der Ausarbeitungsphase erkannt, würde dies verschiedenste Folgeänderungen nach sich ziehen.

Aus diesem Grund reicht die Integration von numerischen Berechnungen und speziell FE-Analysen für Nach- und Optimierungsrechnungen bei weitem nicht aus. Der Konstrukteur muß vielmehr in die Lage versetzt werden, zu einem möglichst frühen Zeitpunkt im Konstruktionsprozeß die Auswirkungen seiner Gestaltfestlegung auf die Bauteilbeanspruchung zu erfassen. Dadurch wird es möglich, von vornherein zu einer hinsichtlich des Kraftflusses optimalen Grobgestalt zu gelangen.

Speziell bei der Vordimensionierung (Grobdimensionierung) in der frühen Entwurfsphase zeigt sich eine deutliche Lücke hinsichtlich der Integration entsprechender Methoden in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozeß. Diese Lücke zu schließen ist das Ziel der Forschungsarbeiten, die durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Innovative rechnerunterstützte Konstruktionsprozesse: Integration von Gestaltung und Berechnung“ gefördert wird.

## 2 Konzepte für die Grobdimensionierung in der frühen Entwurfsphase

Am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik werden drei verschiedene Konzepte für die Unterstützung des Konstrukteurs in der frühen Entwurfsphase verfolgt. Als Grundlage für die Integration der Berechnungen wird das Konstruktionssystem *mfk* mit seinem semantischen relationsbasierten Produktmodell herangezogen.

Die drei Konzepte sind das „Analysetool MTM“, die Integration des Topologieoptimierers MSC/TOPOLOGY in das Konstruktionssystem *mfk* und die „Kraftflußröhre“. Allen drei Konzepten ist gemeinsam, daß sie dem Konstrukteur in den frühen Konstruktionsphasen Ideen für eine (im Rahmen der Grobdimensionierung) möglichst optimale Gestalt auf Basis des Kraftflusses geben.

Da in dieser Phase der Konstruktion noch keine Geometrie vorhanden ist, dienen als Ausgangsbasis der dem Produkt zur Verfügung stehende Bauraum und die Randbedingungen. Durch die Rechnerunterstützung mit dem Konstruktionssystem *mfk* kann der Bauraum als Volumen abgebildet und zusammen mit den Randbedingungen ein

Berechnungsmodell generiert werden. Im Sinne der Technischen Mechanik führt dies zu einem dreiachsigen Spannungszustand.

Jedes dieser drei Verfahren approximiert den dreiachsigen Spannungszustand im Bauraum durch einen einachsigen. Deswegen kann man bei diesen drei Vorgehensweisen auch von Balkenkonzepten sprechen, da ein Balken immer einen einachsigen Spannungszustand repräsentiert. Somit ist im folgenden mit Balken immer der einachsige Spannungszustand gemeint, der aus dem dreiachsigen approximiert wurde. Alle drei Konzepte entsprechen damit voll der BEITZschen Forderung „direkt, kurz, gleichmäßig“ für den Kraftfluß /1/.

Ist eine Vorzugsrichtung im dreiachsigen Spannungszustand a priori nicht erkennbar, muß sie nach Möglichkeit herausgefiltert werden. Hier setzen zwei der drei Konzepte an. Dies ist zum einen die Integration des kommerziellen Topologieoptimierers MSC/TOPOLOGY /2, 3/ in das Konstruktionssystem *mfk* /4/ und zum anderen das Konzept „Kraftflußröhre“. Als Basis dienen, wie oben angesprochen, der Bauraum, der als Volumen vernetzt wird, mit den aufgetragenen Randbedingungen. Die Vernetzung erfolgt über die Anbindung des Konstruktionssystems an den Pre- und Postprozessor des CAD-Systems. Eine FE-Berechnung dieses Modells liefert den oben angesprochenen dreiachsigen Spannungszustand im Bauraum.

Das Programm MSC/TOPOLOGY geht nach einem Optimierungsalgorithmus vor, der die minimale Nachgiebigkeit zum Ziel hat. Bezogen auf die Materialmasse des Bauraums kann dem Programm eine relative Materialmasse vorgegeben werden, die kleiner als 1 ist, wobei durch diese Restriktion die Masse des zu optimierenden Bauteils vorgegeben wird. Der Algorithmus versucht, diese Restriktion dadurch zu erreichen, daß Elemente des vernetzten Bauraums, die zum Kraftfluß sehr wenig beitragen (niedrige Elementspannungen), die Masse und die Steifigkeit entzogen werden. Im Wechsel zwischen FE-Berechnung und „Weichmachen“ von bestimmten Elementen wird eine Bauteilgestalt herausgefiltert, die bei vorgegebener Masse den optimalen Kraftfluß widerspiegelt. Die Integration von MSC/TOPOLOGY in das Konstruktionssystem *mfk* besteht darin, daß das Berechnungsmodell mit Bauraum und Randbedingungen im Konstruktionssystem definiert wird. Die notwendigen Informationen, die MSC/TOPOLOGY benötigt, werden aus der Datenstruktur des Konstruktionssystems herausgefiltert und an den Topologieoptimierer übergeben, der dann die Optimierung durchführt.

Das zweite Konzept „Kraftflußröhre“ geht nach der einmaligen Berechnung des dreiachsigen Spannungszustandes davon aus, daß eine der drei Hauptspannungen dominant ist. Dies ist der Fall, wenn die Formänderungsenergie des durch die größte Hauptspannung approximierten Spannungszustandes den dominanten Anteil an der Formänderungsenergie des gesamten Spannungszustandes repräsentiert (z.B. >60%). Bei Erfüllung dieses Kriteriums soll eine Approximation des Spannungszustandes durch die größte Hauptspannung erfolgen. Durch das Berechnen der Formänderungsenergie aus der größten Hauptspannung und deren Visualisierung im Postprozessor wird eine „Röhre“ erkennbar, die eine Vorstellung vom Kraftfluß im Bauraum gibt.

Das dritte Konzept des Analysetools MTM wird im folgenden beschrieben. Ist eine Vorzugsrichtung in einem dreiachsigen Spannungszustand vorhanden und bekannt, so können der in Vorzugsrichtung konstante Spannungsanteil (Zug/Druck) und der lineare Spannungsanteil (Biegung) prinzipiell mit Hilfe eines Ersatzbalkens modelliert werden.

Da eine zur Modellierung mit finiten Elementen geeignete Geometrie in dieser frühen Phase noch nicht existiert, muß auf Berechnungsverfahren zurückgegriffen werden, die von ihrem Abstraktionsgrad her dieser Phase angemessen sind. Die Modelle der Technischen Mechanik (Stab- und Balkenelemente, Schubfelder, Scheiben usw.) erfüllen diese

Anforderung. Sie gewährleisten außerdem kurze Rechenzeiten bei gleichzeitig für die Grobdimensionierung ausreichender Genauigkeit und Aussagekraft der Ergebnisse.

Der Konstrukteur bekommt mit dieser Entwicklung ein Werkzeug an die Hand, mit dem er für ein abstraktes Berechnungsmodell die am besten geeigneten Profile (Verbindungselemente) ermitteln kann, die eine für die Grobdimensionierung hinreichende Aussagefähigkeit besitzen.

Das eben beschriebene Analysetool MTM soll in diesem Beitrag anhand verschiedener Module und deren Zusammenwirken näher vorgestellt werden.

### **3 Module zur Umsetzung der Konzepts „Analysetool MTM“**

#### **3.1 Balkenmodul**

Voraussetzung für die Entwicklung dieses Balkenmoduls ist die Möglichkeit, im Konstruktionsystem *mfk* Randbedingungen zu definieren, die im Rahmen anderer Arbeiten am Lehrstuhl geschaffen wurde /4/. Entscheidend dabei ist, daß die Randbedingungen nicht nur auf existierender Geometrie definiert werden können, die in der frühen Entwurfsphase noch nicht vorhanden ist, sondern auch auf sogenannten Formelementen, wie z.B. Ebenen, Achsen und Punkten, die das Grundgerüst für eine Konstruktion im Konstruktionsystem *mfk* bilden.

Ein weiterer Grundstein für dieses Balkenmodul ist die Definition von Balkenelementen. Sie können durch Anfangs- und Endpunkt des Elements, sowie einem Winkel, der die Orientierung des Elementkoordinatensystems des Balkenquerschnitts angibt, beschrieben werden. Weiterhin können diesen Balkenelementen auf drei verschiedene Weisen die entsprechenden Querschnittsdaten zugewiesen werden. Dies ist möglich durch

- die direkte Eingabe der entsprechenden Werte durch den Benutzer,
- die Verwendung der Profildatenbank, die mit Hilfe ihrer Berechnungsmöglichkeit aus den vom Benutzer angegebenen Balkenabmessungen die entsprechenden Querschnittswerte ermittelt,
- die Verwendung des Optimierungsmoduls „Monte Carlo“, das nach dem Random-Search-Prinzip Balkenabmessungen ermittelt und mit Hilfe der Berechnungsfunktionalität der Profildatenbank die Querschnittswerte berechnet.

Mit Hilfe von vordefinierten, beliebig im Raum liegenden Ebenen, Achsen und Punkten, mit der Definition von Balkenelementen und Randbedingungen können abstrakte Berechnungsmodelle erzeugt werden. Im Rahmen des Analysetools MTM wurden bis jetzt Balken implementiert, um exemplarisch zu zeigen, daß diese Integration möglich ist. Eine Erweiterung auf andere Modelle der Technischen Mechanik, wie z.B. Platten oder Schubfelder, ist möglich.

Ein weiterer Grundstein dieses Moduls ist, mit Hilfe einer speziell entwickelten Schnittstelle die erzeugten Berechnungsmodelle durch das kommerzielle FE-Programm MSC/NASTRAN berechnen zu lassen. Die Ergebnisse in Form der maximalen Spannung und Verschiebung werden nach der Berechnung im Konstruktionssystem ausgegeben.

Dem Konstrukteur steht damit ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem er sich in den frühen Konstruktionsphasen (noch keine Geometrie vorhanden) ausgehend von vorgegebenen Randbedingungen ein schnelles Bild über die spätere Bauteilbelastung (im Rahmen der Grobdimensionierung) machen kann. Durch das Ändern von Balkenparametern in

verschiedenen Rechnungen ist es möglich, die Auswirkungen von konstruktiven Änderungen auf die Bauteilbelastung zu erkennen.

### **3.2 Profildatenbank**

Die Profildatenbank ist aus zwei Bereichen aufgebaut. Dies ist zum einen die parametrisierte Beschreibung der Profile als benutzerdefinierte Wiederholteile und zum anderen eine Funktion zur Berechnung der Querschnittsparameter (z.B. Querschnittsfläche, Flächenträgheitsmomente), nachdem den parametrisierten Abmessungen konkrete Werte zugewiesen wurden.

In der Struktur der Profildatenbank können die Profile in verschiedene Klassen eingeteilt werden, die die Suche nach einem bestimmten Profil erleichtern (z.B. offene Profile, geschlossene Profile). Durch die Einführung einer Klasse firmenspezifischer Profile ist die Ankopplung einer spezifischen Profildatenbank denkbar. Exemplarisch wurden die drei Standardprofile Rechteck-, Kreisring- und I-Profil implementiert.

Der Konstrukteur kann die Profile auf zwei verschiedene Weisen benutzen. Entweder zur Erzeugung eines FE-Balkens, indem er die geometrischen Abmessungen des Profils auf Abfrage eingibt. Die notwendigen Querschnittswerte, wie z.B. Querschnittsfläche oder Flächenträgheitsmomente werden dann automatisch berechnet und dem FE-Balken zugeordnet. Ein Vorteil hiervon ist die Darstellung des FE-Balkens durch die Volumenausprägung des Profils. Der Konstrukteur ist somit in der Lage, die Querschnittsabmessungen der Profile visuell zu erkennen. Die andere Möglichkeit der Verwendung der Profildatenbank ist das Einbinden eines Profils in die aktuelle Konstruktion. Nach der Eingabe der notwendigen Querschnittsabmessungen kann der Konstrukteur über Anklicken von Anfangs- und Endfläche, die das Profil in seiner Länge begrenzen, sowie die Angabe von Profilachse und Orientierungsebene ein Profil als Volumenelement in die Konstruktion einbringen.

Der zweite Bereich, die Funktion zur Berechnung der Querschnittswerte, ist notwendig, um für beliebige Werte der variablen Maße der benutzerdefinierten Wiederholteile die Werte für z.B. die Flächenträgheitsmomente zu bekommen. Die Berechnung stützt sich dabei auf Näherungsformeln /5/, die für den Bereich der frühen Konstruktionsphasen ausreichende Genauigkeit liefern.

### **3.3 Optimierungsalgorithmus „Monte Carlo“ zur Querschnittsauslegung**

Zur Bestimmung geeigneter Balkenquerschnitte wird ein Optimierungsalgorithmus verwendet. Dadurch wird es möglich, bei der Grobdimensionierung eines Bauteils hinsichtlich eines vorzugebenden Zieles (z.B. maximale Steifigkeit oder minimales Gewicht) und unter Berücksichtigung bestimmter Restriktionen (z.B. zulässige Spannung, zulässige Verformung, etc.) die optimalen Querschnitte festzulegen. Die möglichen Querschnittsformen und -abmessungen werden dabei durch entsprechende Designvariablen (z.B. Profiltyp, Höhe, Breite, Stegdicke, ...) beschrieben. Durch Variation dieser Designvariablen ergeben sich unterschiedliche Lösungen, aus denen unter den gegebenen Bedingungen (Optimierungsziel, Restriktionen) die optimale zu ermitteln ist.

Aus der Vielzahl bekannter Optimierungsverfahren wurde für diesen Zweck die sog. Monte-Carlo-Methode /6/ ausgewählt und das Konzept für ein Optimierungstool entwickelt. Der Optimierungsalgorithmus arbeitet nach dem Random-Search-Prinzip. Dabei wird eine vorgegebene Anzahl an Würfeln (zufällig gewählte Zustände der Designvariablen) ausgeführt und die gewürfelte Lösung jeweils mit der bisher besten Lösung verglichen. Ist die neu

gewürfelte Lösung schlechter, wird sie verworfen; ist sie besser als das bisherige Optimum, wird sie beim jeweils folgenden Wurf als neues Optimum betrachtet. Die Methode zeichnet sich gegenüber anderen Optimierungsverfahren dadurch aus, daß

- die Zielräume nicht konvex oder zusammenhängend sein müssen,
- keine Differenzierbarkeit der Zielfunktionen gefordert wird,
- die Designvariablen sowohl diskret als auch kontinuierlich gewählt werden können,
- sich aus den vorstehenden Gründen ein absolut robustes Verhalten ergibt,
- das Verfahren auch zur Optimierung mit mehreren Zielfunktionen einsetzbar ist (Vektoroptimierung) und
- bei ausreichend hoher Wurfzahl das globale Optimum sicher gefunden wird.

Nachteilig ist allerdings, daß gesicherte Ergebnisse nur mit hohen Wurfzahlen zu erzielen sind. Je mehr Designvariablen definiert werden, desto höher ist die Wurfzahl (wegen des größeren Lösungsraumes) zu wählen und desto länger wird dadurch die Laufzeit des Programms.

Durch die Einbindung des Formelinterpreters MAPLE in den Algorithmus ist die Vorgabe nahezu beliebiger, analytisch formulierbarer Zielfunktionen und Restriktionen möglich. Bei sehr einfachen Problemstellungen, für die geschlossene analytische Ausdrücke existieren, lassen sich die auftretenden Spannungen und Verformungen noch direkt angeben. Für die hier interessierenden Bauteile ist das jedoch i.a. nicht mehr möglich. Deshalb ist hier die Einbindung des Balken-FE-Programms MSC/NASTRAN in den Optimierungsablauf notwendig.

### **3.4 Modul zur Berechnung von Torsionsflächenträgheitsmomenten**

Das Ziel dieses Moduls ist die Möglichkeit Torsionsflächenträgheitsmomente für firmenspezifische Profile zu berechnen, die durch Näherungsformeln nicht mehr ermittelt werden können.

Hierfür wurden zwei bereits existierende Programme in die Entwicklung mit einbezogen. Das ist zum einen das am Lehrstuhl für Technische Mechanik (Universität Erlangen-Nürnberg) entwickelte, auf der Randelementemethode basierende Berechnungsprogramm BETTI und zum anderen das am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik entwickelte Softwaretool zur Erstellung eines Eingabedatensatzes für vorgenanntes Programm. Um diese Programme im Analysetool MTM verwenden zu können, wurden sie in das Konstruktionsystem integriert.

### **3.5 Bauraummeßfunktionen**

Eine Restriktion bei der Suche nach den optimalen Profilen im Analysetool MTM ist die Einhaltung des Bauraums. Im Konstruktionsystem *mfk* wurde die Abbildung von Bauräumen im Rahmen anderer Arbeiten entwickelt /4/. Auf dieser Grundlage wurden sogenannte Bauraummeßfunktionen entwickelt. Sie geben die Möglichkeit, von festgelegten Punkten im Bauraum den minimalen Abstand zur Bauraumbegrenzung zu ermitteln. Auf diese Weise ist es möglich, die Grenzen der Designvariablen für die Profile (z.B. Höhe, Breite) vorab so festzulegen, daß der Bauraum eingehalten wird.

## **4 Zusammenfassung**

Durch das Zusammenwirken der verschiedenen Module kann dem Konstrukteur mit dem Analysetool MTM ein Werkzeug angeboten werden, mit dem er in der frühen Entwurfsphase seiner Konstruktion eine im Sinne der Grobgestalt optimale Bauteilgestalt ermitteln kann. Hierfür stehen ihm im Konstruktionssystem *mfk* verschiedene Module zur Verfügung, die ihn bei dieser Arbeit unterstützen. Das Balkenmodul ermöglicht die Definition von abstrakten Berechnungsmodellen und deren Analyse. Mit Hilfe der Profildatenbank erfolgt zum einen die visuelle Unterstützung bei der Darstellung von Berechnungsmodellen und zum anderen die Berechnung der Querschnittskennwerte von Standardprofilen. Kennwerte von firmenspezifischen Profilen können mit dem Zusatzmodul auf Basis der Randelementmethode ermittelt werden. Mit dem Optimierungsalgorithmus „Monte Carlo“ werden anhand zufällig gewählter Zustände der Profilabmessungen die geeignetsten Profile ausgewählt. Hierbei können durch Bauraummeßfunktionen die entsprechenden Profilabmessungen so gesteuert werden, daß die ermittelte Grobgestalt den zur Verfügung stehenden Bauraum einhält.

## 5 Literatur

- /1/ Zhao, B.j.; Beitz, W.: Prinzip der Krafteinleitung: direkt, kurz, gleichmäßig, Zeitschrift Konstruktion, Heft 47, Springer-Verlag, 1995.
- /2/ N.N.: MSC/SHAPE - MSC/TOPOLOGY. User's Guide, MacNeal-Schwendler GmbH, München, Karlsruhe, 1996.
- /3/ N.N.: Shape and Topology Optimization - Using CAOSS and MSC/NASTRAN. MSC World User's Conference, Los Angeles, May 8.-12., 1995.
- /4/ Löffel, C.: Integration von Berechnungswerkzeugen in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozeß; Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg; Erlangen, 1997.
- /5/ Beitz, W.; Küttner, K.-H.:Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau; Springer-Verlag; 16. korrigierte und ergänzte Auflage; Heidelberg 1987.
- /6/ Osyczka, A.: MULTICRITERION OPTIMIZATION IN ENGINEERING with FORTRAN programs; University of Cracow; Warsaw, 1984.

Dipl.-Ing. Christoph Heynen  
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
Prof. Dr.-Ing. Harald Meerkamm  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Martensstraße 9  
91058 Erlangen  
Tel.: +49 9131 / 61 99 12, Fax.: +49 9131 / 61 99 30  
E-mail: [heynen@mfk.uni-erlangen.de](mailto:heynen@mfk.uni-erlangen.de)  
WWW-Adresse: <http://www.mfk.uni-erlangen.de>