

## **DURCHGÄNGIGE FUNKTIONSMODELLIERUNG IN DEN FRÜHEN KONSTRUKTIONSPHASEN**

*Michael Koch und Harald Meerkamm*

### **Zusammenfassung**

Der Stand der Technik in den frühen Konstruktionsphasen stellt sich derart dar, dass praktisch keine rechnerunterstützten Werkzeuge für die Konstruktionsarbeit in diesen Phasen verfügbar sind. Die Probleme, die daraus resultieren, sind einerseits eine unzureichende Anwendung der Konstruktionsmethodik und andererseits eine schlechte Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen, die während des Entwicklungsprozesses getroffen wurden. Um dieses Problem zu beheben und um Entscheidungen in den frühen Phasen nachvollziehbar und klar für mitarbeitende Konstrukteure zu machen, wurde das Konstruktionssystem *mfk* (*KSmfk*) durch ein weiteres Tool speziell zur Einbindung der frühen Konstruktionsphasen erweitert. Dieses Tool „FunktionsStrukturModellierer“ und die dahinter liegenden Strategien (zum Beispiel zum Übergang in 3D-Bauraum-Strukturen) und Methoden werden im Folgenden eingehend erläutert werden.

### **1 Stand der Technik und Motivation**

Besonders in jüngster Zeit wird für eine effiziente Produktentwicklung immer mehr der gesamte Konstruktionsprozess vom ersten Gedanken an ein Produkt über den Entwurf und das Konzept bis zur Ausgestaltung als zielführend angesehen. Dabei rückt der Bereich der frühen Entwicklungsphasen in denen noch keine Geometrie vorliegt immer mehr in den Vordergrund. Es wurde erkannt, dass in diesen frühen Phasen bereits viele sehr wichtige Entscheidungen getroffen werden, die starke Auswirkungen auf die spätere Umsetzung und Ausgestaltung eines Produkts haben. Parallel dazu stellt sich der Stand der Technik so dar, dass die Geometrieverwaltung, -handhabung und -darstellung bei modernen CAD-Systemen für die geometriereichen späten Phasen bereits auf einem sehr hohen Niveau angekommen ist. Im Gegensatz dazu fehlt es dem Konstrukteur in den frühen Entwicklungsphasen einerseits an einer konsequenten und nachvollziehbaren Anwendung der Methodik. Andererseits sind in den geometrielosen Phasen fast keine Software-Werkzeuge vorhanden, die den Entwickler auf seinem Weg hin zur CAD-basierten Geometrieerzeugung unterstützen.

### **2 Anforderungen**

Ein Werkzeug, das das methodische Vorgehen des Konstrukteurs unterstützt und überwacht, ist eine der wichtigsten Umsetzungen auf dem Weg zum einen vollständig computerunterstützten Konstruktionsvorgang. Aus diesem Grund muss ein Werkzeug entstehen, das den Konstrukteur durch die Methodik führt und ihm den roten Faden für einen geradlinigen, effizienten, nachvollziehbaren und letztlich erfolgreichen Weg vorgibt. Dazu sind ebenfalls geeignete Datenmodelle zu Speicherung und Verwaltung der anfallenden Informationen zu realisieren.

Als besonders wichtig hat sich hierbei die Konzeptphase erwiesen, da hier zum ersten Mal die Weichen für grundlegende Eckpunkte des Produkts gestellt werden. Der noch früher im Konstruktionsablauf angesiedelten Planungsphase soll deshalb im Folgenden weniger Aufmerksamkeit geschenkt werden, da hier häufig Daten mit mehr betriebswirtschaftlicher

Ausrichtung zum tragen kommen. Hier sind beispielsweise Fragestellungen, ob oder welches Produkt von den potentiellen Kunden überhaupt gewünscht wird, interessant. Diese Daten hängen nicht direkt mit der eigentlichen „Konstruktion“ eines Produkts zusammen und können deshalb problemloser – eventuell sogar getrennt – abgelegt werden. In der Konzeptphase fallen allerdings sehr viele Daten an, die in direktem Zusammenhang zu den späteren Geometriedaten stehen. Aus diesem Grund ist es notwendig, zumindest alle Konstruktionsdaten ab der Konzeptphase in einem gemeinsamen Datenmodell zentral zu speichern. Hierfür kann auf das Konstruktionssystem *mfk* (*KS<sub>m</sub>mfk*) zurückgegriffen werden.

Das *KS<sub>m</sub>mfk*, das am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (Universität Erlangen-Nürnberg) entwickelt wird, ist ein Ansatz, die beschriebene fehlende durchgängige Unterstützung des Konstruktionsprozesses mit der Einbindung der frühen Konstruktionsphasen zu bieten. Das hybride (auf relationalen Strukturen basierende) Produktmodell des *KS<sub>m</sub>mfk* /1/ bietet für die Unterstützung der frühen Konstruktionsphasen deshalb so viel Potential, da durch die Verwendung einer sehr leistungsfähigen kommerziellen Datenbank (Oracle™) außer geometrischen Daten auch beliebige semantische Dateninhalte zu jedem Zeitpunkt des Konstruktionsprozesses im Produktmodell abgelegt werden können. Durch den Zugriff auf die Datenbank über Standardschnittstellen (SQL) ist es außerdem möglich, das Produktmodell von verschiedensten Softwareprodukten aus mit Daten zu bedienen. Diese Möglichkeit wird bislang nur von CAD-Systemen ausgenutzt. Für eine effiziente Unterstützung des gesamten Konstruktionsprozesses wird die Möglichkeit des unabhängigen Zugriffs auf das Produktmodell aber äußerst wichtig sein.

Die Feststellung, dass in den frühen Entwicklungsphasen effiziente Softwaretools nötig sind, lässt noch die Frage offen, durch welche Werkzeuge die oben beschriebene Lücke im Konstruktionsprozess zu füllen ist. Hierfür existieren sehr viele verschiedene Theorien. Mehrere dieser Ansätze wurden bereits in Softwareprodukten umgesetzt (CadSys /4/, HNI /7/, TechOptimizer™ /5/ usw.). Durch den fehlenden Anschluss an vorausgehende und vor allem nachfolgende Schritte im Konstruktionsprozess konnten sich Insellösungen aber nicht entsprechend durchsetzen.

Allen Vorgehensweisen ist aber gemein, dass letztlich eine Strukturierung des zukünftigen Produkts erfolgt. Nach einem Vergleich der verschiedenen theoretischen Konzepte /3/ wurde für diese Umsetzung die Methode nach Pahl und Beitz gewählt. Sie verbindet verschiedene Funktionen des Produkts zu Funktionsstrukturen und macht so eine flexible Strukturierung der Konstruktion möglich.

### 3 Funktionsmodellierung

#### 3.1 Funktionsstrukturen nach Pahl und Beitz

Nach dem Vorgehen von Pahl und Beitz /8/ werden Funktionen durch Abstraktion formuliert. Ist die Gesamtaufgabe im Wesenskern formuliert, wird daraus eine Gesamtfunktion definiert. Je nach Komplexität der zu lösenden Aufgabe wird die sich ergebende Gesamtfunktion ebenfalls mehr oder weniger komplex sein. Die Gesamtfunktion kann – falls notwendig – in Teilfunktionen geringerer Komplexität aufgegliedert werden. Die Verknüpfung der einzelnen Teilfunktionen ergibt die Funktionsstruktur, die insgesamt wieder die Gesamtfunktion darstellt. Die Verknüpfungen zwischen den einzelnen Teilfunktionen werden durch definierte Verbindungen erreicht. Hierfür kommen drei verschiedene Ströme zum Einsatz: Energie, Signale und Stoffe.

Durch die vom Konstrukteur beliebig zu wählende Detaillierungsebene der Funktionsstruktur ist es möglich, diese Methode praktisch über den gesamten Verlauf der geometrielosen Konzepterstellung zu verwenden. So können zu Beginn sehr allgemeine Funktionen

aufgestellt werden, die dann im Laufe der Entwicklung immer weiter verfeinert und detailliert werden.

### 3.2 Anforderungen

Bereits frühzeitige Versuche mit „konventionellen“ Hilfsmitteln (hier also Papier und Bleistift) /2/ haben gezeigt, dass sich die Anforderungen an die verwendeten Funktionen im Verlauf der Konstruktion grundlegend ändern. So steigt die Menge der zu verwaltenden Inhalte pro Teilfunktion beständig an. Während bei frühen Funktionsstrukturen allein eine semantische Information zur Gliederung der Gedanken ausreichend ist, kommen im Lauf der Zeit beispielsweise Kennziffern bezüglich der Komplexität der Funktion oder andere Zusatzinformationen in Betracht. „Den“ (Grund-) Funktionentyp, mit dem man die gesamte Breite des Entwicklungsprozesses abdecken kann, wird es also nicht geben.

Aus den obigen Feststellungen wird einerseits deutlich, dass sich das „Aussehen“ einer Teilfunktion mit fortschreitender Detaillierung des Konstruktionsablaufs ändert. Die Inhalte werden sowohl modifiziert als auch erweitert. Andererseits ist es unwahrscheinlich, dass alle verwendeten Teilfunktionen in der gleichen Detaillierungsstufe vorliegen. Dennoch sollen sie problemlos miteinander verbunden werden können. Diese immer verfügbaren Verknüpfungen werden in dem hier vorgestellten Ansatz – wie oben bereits kurz erwähnt – durch fest vorgegebene Schnittstellen erreicht. Diese Schnittstellen bleiben über alle Entwicklungsstufen der Funktion hinweg konstant. Durch die fest vorgegebenen abstrakten Verbindungen (Energie, Stoff und Signal) kann so die angestrebte Kompatibilität erreicht werden. Beim Erstellen einer Funktion ist also lediglich festzulegen, wie viele Ein- und Ausgänge von Energie, Stoff und Signal gebraucht werden. Diese Ein- und Ausgänge sind für die entsprechende Funktion dann fixe Rahmenbedingungen.

Vor allem innerhalb eines bestimmten Themengebietes oder innerhalb einer Firma werden sicher immer wieder Funktionen eines bestimmten Typs verwendet. Es ist daher sinnvoll, die Funktionsdefinitionen, die sich bereits als funktionstüchtig erwiesen haben, in einem Katalog abzulegen. Dieser Katalog beinhaltet dann von jedem Funktionsbaustein unterschiedliche Detaillierungsgrade, das heißt sowohl prinzipielle Informationen für die frühen Phasen als auch weitergehende Daten über beispielsweise die physikalischen Effekte, die für spätere Berechnungen in nachgelagerten Phasen wichtig sein können. Die Verwaltung des Katalogs kann durch die Schemaerweiterung der Datenbank ebenfalls in das Produktmodell integriert werden. Der Konstrukteur kann sich dann aus dieser Auswahl die für das spezielle Produkt in Frage kommenden Bausteine auswählen und diese zu einer Funktionsstruktur anordnen, variieren und gruppieren. Die dafür notwendigen Zusatzinformationen lassen sich ebenfalls im Produktmodell darstellen. Die Grundlage für einen Konstrukteur sind also die Funktionsdaten, die im Produktmodell hinterlegt sind. Um das verwaltete Wissen im Produktmodell immer korrekt und auf dem Stand der Technik zu halten bedeutet das natürlich auch, dass das Produktmodell neue Funktionen aufnehmen und weiterverarbeiten können muss. Ebenso wäre es denkbar, ein lernendes System dahingehend zu schaffen, dass dem Konstrukteur vorrangig Vorschläge unterbreitet werden, die sich in ähnlichen Konfigurationen bereits als gut geeignet herausgestellt hatten. Die Möglichkeit, mehrere Funktionen zu komplexeren Zusammenhängen fest zu verkoppeln und als black-box in die Reihe der bestehenden Funktionen einzureihen bietet sich für allem für immer wiederkehrende Bausteine an. Natürlich muss der Entwickler diese Funktionsbausteine selbst definieren und modifizieren können. Die beschriebenen Benutzereingriffe in die Datenbank wie das Hinzufügen, Modifizieren und Verbinden von Funktionen können durch die Datenbank-Standardschnittstelle auch von außerhalb des Konstruktionssystems realisiert werden.

Liegt eine Funktionsstruktur einmal in digitaler Form vor, ist es nahe liegend, diese Struktur auch hinsichtlich verschiedener Kriterien zu überprüfen.

Die Analysemöglichkeiten für eine so generierte Funktionsstruktur sind vielfältig. Beispielsweise ist eine Kontrolle der gegenseitigen Beeinflussung von Funktionsblöcken denkbar. Das System könnte die Blöcke im Anschluss an die Analyse optimal anordnen. Dieses Prinzip wird in Bild 1 veranschaulicht: hier sind ein wärmeabgebender Widerstand und ein Kälteelement dicht nebeneinander angeordnet. Die ungünstige Wärmesituation kann vom System erkannt und durch Umstrukturierung gelöst werden.

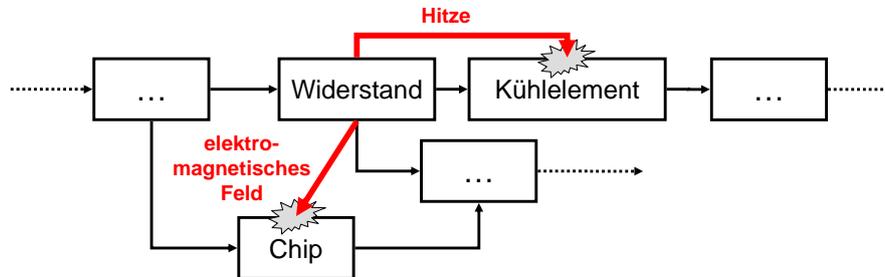


Bild 1: Frühzeitiges Erkennen von Beeinflussungen in der Funktionsstruktur

### 3.3 Bauräume

Bei dem Ansatz, auch die frühen Phasen mit dem Produktmodell zu unterstützen, ist ein möglichst direkter Übergang ins CAD-System von besonderer Bedeutung. Ohne eine unterbrechungsfreie Umsetzung wären die Vorteile, die durch die Einbindung der frühen Phasen erreicht werden, wieder verspielt.

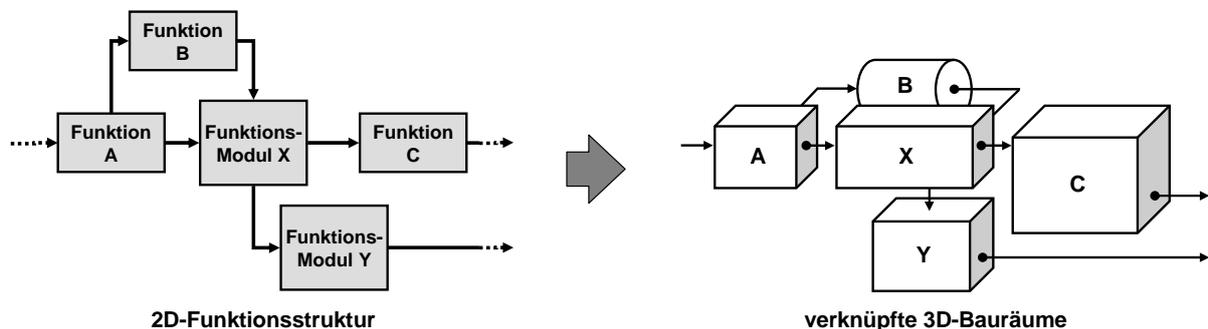


Bild 2: Übergang von 2D-Funktionsstrukturen zu verknüpften 3D-Bauräumen

Um einen solchen Übergang herzustellen, muss die zweidimensionale Funktionsstruktur in eine dreidimensionale Anordnung überführt werden (Bild 2). Dazu können zwei konkrete Informationen verwendet werden: einerseits liegen die Daten über das benötigte Volumen jeder einzelnen Funktion in der Datenbank vor und können im Dreidimensionalen zur Erzeugung eines Bauraums verwendet werden. Diese einzeln generierten Bauräume sind dann mit den Informationen zu den Kopplungen (die auch schon in der Funktionsstruktur verwendet wurden) zu einem Gesamtbauraum zu kombinieren. Mit diesem dreidimensionalen Bauraum-Modell ist dem Entwickler eine erste Hilfestellung gegeben, die er jetzt Schritt für Schritt „mit Leben füllen“ kann. Es handelt sich hierbei keinesfalls um eine reine Konfiguration, da hier keine Lösung vorgegeben wird, sondern nur die Randbedingungen anhand früherer Erfahrungswerte gesetzt werden. Der Konstrukteur wird in seiner Kreativität also in keiner Weise eingeschränkt.

## 4 Erweiterung des Modells „Funktionsstruktur“

Von besonderem Interesse für eine ganzheitliche Betrachtung aller Konstruktionsphasen ist zweifelsohne der Übergang von der Funktion zur Geometrie. Dieser Schritt ist auf der Funktionsebene deshalb kritisch, da bei der Formulierung einer Funktionsstruktur ganz bewusst eine Beachtung der späteren stofflichen Realisierung vermieden werden soll. Um nun als Endziel eine integrierte Rechnerunterstützung gerade in frühen Phasen anbieten zu können, muss eben dieser Schritt des Übergangs zur Geometrie am Rechner vollzogen werden können. Dazu sind geeignete Erweiterungen des klassischen Modells „Funktionsstruktur“ notwendig. Allerdings muss stets beachtet werden, dass logischerweise in einer bestimmten Konstruktionsphase nur die Information verwendet werden kann, die in ebendieser Phase verfügbar ist. Daher stellt sich bei der Erweiterung der Funktionsstruktur die Frage, auf welche Informationen und Parameter der Konstrukteur nach einer sorgfältigen Klärung der Aufgabenstellung und einer Einteilung des Gesamtsystems in Teilfunktionen und deren Verknüpfungen zugreifen kann.

### 4.1 Von der Funktionsstruktur zur Wirkstruktur

Bei einer Erweiterung der klassischen Funktionsstrukturen nach Pahl/Beitz in die dreidimensionale Welt der Geometriemodellierung hinein muss grundsätzlich der Wandel Beachtung finden, den die gesammelten und erzeugten Daten während des Fortschreitens im Konstruktionsprozess durchmachen. Während man anfangs von einer Funktionsstruktur spricht, so verliert diese Schritt für Schritt durch die Hinzunahme weiterer Informationen ihren abstrakten Charakter und wandelt sich zu einer Wirkstruktur. Nur durch diesen Wandel ist es überhaupt möglich, grundsätzlich abstrakte Ansätze in konkrete Lösungen überzuführen.

### 4.2 Dimensionen der Verknüpfungs-Medien

Wie bereits erwähnt werden Teilfunktionen über Stoff- Energie und Signalflüsse verknüpft. Dabei ist es für spätere Realisierungen, insbesondere für Dimensionierungsaufgaben, von entscheidender Bedeutung, in welchen Dimensionen sich diese Flüsse bewegen. So muss sich der Konstrukteur beispielsweise bei der Konstruktion einer Kaffeemaschine fragen, ob 1, 5, 10 oder 100 Liter Wasser in einem Takt verarbeitet werden sollen. Und in welchen Dimensionen bewegt sich die zur Zerkleinerung von Kaffeebohnen notwendige Kraft? Antworten auf derartige Fragen müssen nach einer sorgfältigen Analyse der Aufgabenstellung entweder direkt aus den Anforderungen oder aus der Betrachtung grundsätzlicher physikalischer Zusammenhänge möglich sein. Es wird im Rahmen dieses Ansatzes also gefordert, die Dimension zur Verknüpfung zweier Funktionen als Bestandteil der Funktionsstruktur zu berücksichtigen.

### 4.3 Umsetzung der Bauräume

Wie oben bereits erwähnt, ist eine wesentliche Schnittstelle beim Übergang von der Funktion zur Geometrie in der Formulierung der Art und Dimension des für die Erfüllung der Funktion notwendigen Bauraumes zu finden. Um diese Möglichkeiten anfangs noch überschaubar und handelbar zu halten, soll hier zunächst nur zwischen zwei prinzipiell unterschiedlichen Bauräumen differenziert werden: Quader und Zylinder. Zylinderförmige Bauräume (Bild 3) werden dann angewendet, wenn die zugrunde liegende Funktion rotative Bewegungen erfordert (zum Beispiel „Drehmoment übertragen“ für Wellen) oder wenn derartige Funktionen allgemein mit rotationssymmetrischen Elementen realisiert werden (zum Beispiel „Kaffee speichern“ für Kannen, Tassen, usw.).

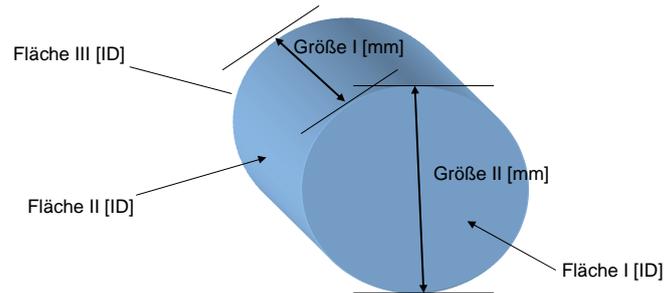


Bild 3: Zylindrischer Bauraum

Quaderförmige Elemente (Bild 4) stehen als allgemeine Bausteine für die Beschreibung eines Bauraumes zur Verfügung. Sie können gleichermaßen für die räumliche Abgrenzung komplexer Teilsysteme als auch für die Modellierung eines einfachen Gehäuses dienen.

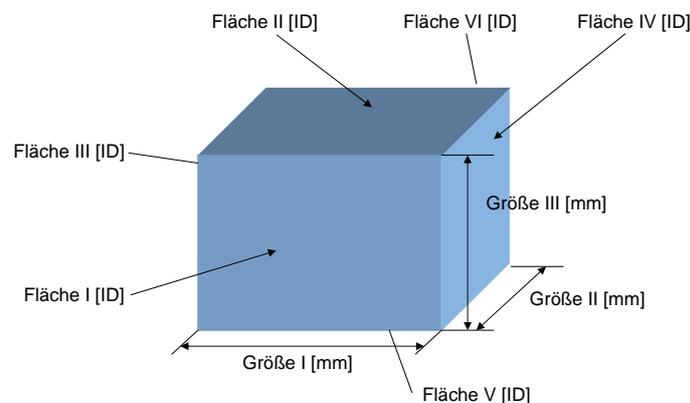


Bild 4: Quaderförmiger Bauraum

Die Dimension des Bauraumes als grösste Abschätzung des späteren Bauteiles kann im Allgemeinen auf der Grundlage der Dimensionen der beteiligten Flüsse abgeschätzt werden.

Durch die Berücksichtigung des Bauraumes wird die Funktionsstruktur also um folgende Elemente erweitert:

- Art des Bauraumes (Quader, Zylinder)
- Größe  $i$  des Bauraumes (Quader:  $i = 3$ ; Zylinder:  $i = 2$ )
- Fläche  $j$  des Bauraumes (Quader:  $j = 6$ ; Zylinder:  $j = 3$ )

#### 4.4 Verknüpfte Flächen

Durch die Zuweisung eines Bauraumes wird es möglich, Verknüpfungen zwischen Funktionen näher zu charakterisieren. Ob das quaderförmige Modul A zur Erfüllung der Funktion A stirn- oder umfangsseitig am zylindrischen Modul B zur Erfüllung von Funktion B angebracht werden muss, geht im allgemeinen bereits aus der Aufgabenstellung hervor. Derartige Sachverhalte können nun bereits bei der Formulierung der Funktionsstruktur durch Abgabe der ID der verknüpften Flächen bei der Bildung einer Verknüpfung berücksichtigt werden (Bild 5). Eine derartige Einteilung des zu schaffenden Produktes in verknüpfte einfache geometrische Körper schafft nun sehr frühzeitig Randbedingungen für eine sinnvolle Parallelisierung der Konstruktionsaufgaben, was für eine Bearbeitung der Aufgabe im Team eine notwendige Voraussetzung darstellt.

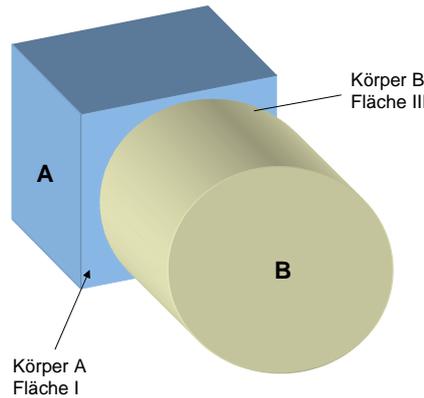


Bild 5: Verknüpfung von Bauräumen

### 4.5 Komplexität der Funktion

Schließlich soll mit der Komplexität einer Funktion noch eine rein heuristische Größe in das Modell der Funktionsstruktur aufgenommen werden. In den meisten Fällen gelingt bereits bei der Formulierung einer Funktion zumindest eine vergleichende Abschätzung ihrer Komplexität. So steht außer Frage, dass die Funktion „Bohnen mahlen“ komplexer ist als etwa die Funktion „Kaffeefatz speichern“. Eine frühzeitige Analyse und Einschätzung der Komplexitäten der Teilfunktionen schafft zum einen eine Basis für die Planung der Kapazitäten und Formulierung der Prioritäten für die weiteren Konstruktionsphasen und ermöglicht zum anderen bereits eine Abschätzung der Anforderungen an die resultierenden Fertigungs- und Montageprozesse. Dies wäre, nicht zuletzt im Hinblick auf eine ganzheitliche Rechnerunterstützung, ein nicht unerheblicher Schritt in Richtung integrierte Fertigungs- und Montageplanung.

## 5 Beispiel: Kaffeemaschine

Das Beispiel der Kaffeemaschine wurde bereits an verschiedenen Stellen verwendet, um die dargestellten Sachverhalte möglichst anschaulich darzustellen. Bild 6 zeigt dieses Modell, das mit dem Programm „FunktionsStrukturModellierer“ aufgebaut wurde. Zu sehen ist hier ein Ausschnitt der Datenbank und die 2D-Wirkstruktur. Außerdem wurde *eine* denkbare Bauraum-Anordnung dargestellt.

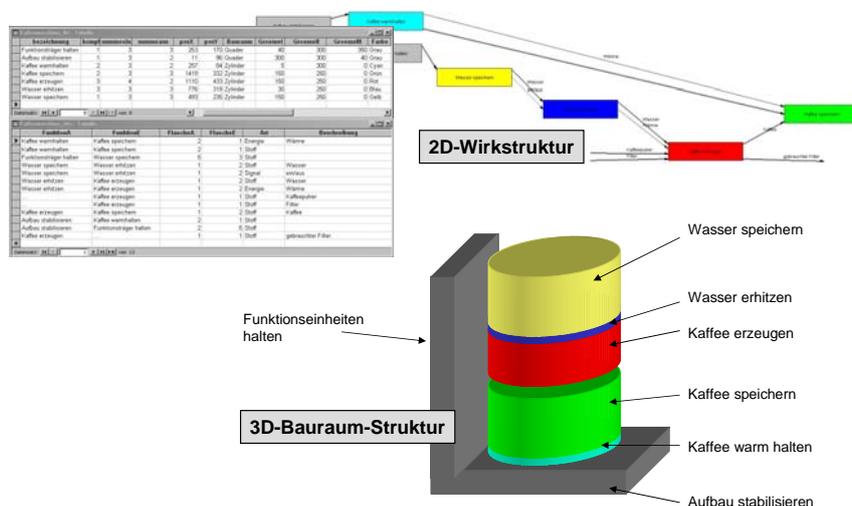


Bild 6: Beispiel „Kaffeemaschine“ von der Wirkstruktur zum Bauraum-Modell

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Vorangegangenen wurde die Ausdehnung der funktionsorientierten Ansätze von Pahl/Beitz in die dreidimensionalen Konstruktionsphasen hinein beschrieben. Durch diesen Schritt wird ein besserer Übergang von den nichtgeometrischen Phasen der Konzeptfindung in die stärker geometrieorientierte Ausarbeitung eines Produkts möglich.

Zusätzliche Erweiterungen des Funktionsmodells sind durchaus denkbar. So wird zum Beispiel derzeit im Sonderforschungsbereich 396 daran gearbeitet, die Kosten eines Bauteiles sehr frühzeitig näherungsweise durch die Wahl der Bauraumgröße festzulegen. Aber auch für bereits bestehende Ansätze wie Berechnungswerkzeuge /6/ für die frühen Konstruktionsphasen ist dieser Ansatz hilfreich, da aus diesen Teilen des *KS<sub>m</sub>fk* ebenfalls direkt auf die aus der Wirkstruktur generierten Baurauminformationen zurückgegriffen werden kann.

## 7 Literatur

- [1] Koch, M.: „Konzept und Realisierung eines hybriden Produktmodells“, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Erlangen, 1999.
- [2] Koch, M.: „Digital-Mock-Up am Beispiel eines Industrie-Manipulators“, in: „11. Symposium Design for X (DfX)“, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (Universität Erlangen-Nürnberg), Schnaittach, 2000, Seiten 83-88.
- [3] Koch, M.: „Schritte zum Digital Mock-up am Beispiel eines Industrie-Manipulators“, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (Universität Erlangen-Nürnberg), Erlangen, 2000.
- [4] Krause, F. L., P. Tang, *et al.*: „Abschlussbericht integrierte virtuelle Produktentstehung“, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart, 2002.
- [5] Lindemann, U., M. Amft, *et al.*: „Rechnerunterstützung für frühe Phasen der Entwicklung“, in: „F&M Feinwerktechnik Mikrotechnik Mikroelektronik“, Seiten 123-127.
- [6] Löffel, C.: „Integration von Berechnungswerkzeugen in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess“, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 1997.
- [7] Möhringer, S. und J. Gausemeier: „An Interface Specification for Principle Solutions Supporting the Cross-Domain design of Mechatronic Systems“, in: „7th International Design Conference - DESIGN 2002“, The Design Society, Dubrovnik (Croatia), 2002, Seiten 533-538.
- [8] Pahl, G. und W. Beitz: „Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung“, Springer-Verlag, Berlin, 1993.

Dipl.-Ing. Michael Koch  
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
FAU Erlangen-Nürnberg  
Martensstraße 9 - D-91058 Erlangen  
Tel: 0049-9131-85-23216  
Fax: 0049-9131-85-23223  
Email: mlkoch@mfk.uni-erlangen.de  
URL: <http://www.mfk.uni-erlangen.de>