

## **MODELLBILDUNG UND TRANSFORMATION IN DEN FRÜHEN PHASEN DER MECHATRONISCHEN PRODUKTENTWICKLUNG**

*SCHÖN, A.*

### **Kurzfassung**

Der Übergang von abstrakteren zu konkreteren Modellen und umgekehrt ist Kern der Produktentwicklung. Bei einem mechatronischen System erhöht sich der Schwierigkeitsgrad, denn die konkreten Modelle der technischen Komponente stammen aus verschiedenen Ingenieurwissenschaften. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der formalen Beschreibung eines Systems für die Überführung von Modellen unterschiedlicher Abstraktionsstufen, zeigt Nutzen und Eigenschaften an einem konkreten Beispiel und leitet Anforderungen und Ansätze an ein Werkzeug ab, das diesen Übergang unterstützt.

### **1 Einleitung**

Abstraktion ist eine der schwierigsten Aufgaben, die ein menschliches Gehirn vollziehen kann; Modellbildung ist ein Erscheinungsbild davon. Der Prozeß der Modellbildung eines technischen Produkts besteht in der gezielten Vereinfachung des naturgemäß unformalen Erscheinungsbildes des Systems, seines Verhaltens oder ähnlichem. Ziel ist eine formale Behandlung der Gegebenheiten unter approximierter Ähnlichkeit gewünschter Eigenschaften zum realen Verhalten. Dabei muß sich der Modellbilder stets bewußt sein, welche Einschränkungen er seinem Modell auferlegt hat, um es handhabbar zu gestalten. Es ist leicht einsichtig, daß Modellbildung keineswegs automatisierbar ist und immer anwendungsspezifisch durchgeführt werden muß. Ein Versuch den Menschen als Modellbilder zu ersetzen muß zwangsläufig scheitern, aber eine Unterstützung in einigen Bereichen erscheint durchaus wertvoll.

Der entscheidende Schritt in der mechatronischen Produktentwicklung besteht im Übergang zwischen Funktionsstruktur zu Wirkstruktur. An dieser Stelle fällt die Entscheidung für die Disziplin in der die jeweilige Funktion erfüllt werden soll.

### **2 Mechatronische Produkte**

Für den Beschreibungsterminus „mechatronisches Produkt“ existieren eine Vielzahl unterschiedlichster Definitionen, welche alle das Zusammenwirken verschiedener Ingenieursdisziplinen und der Informationsverarbeitung zur Geltung bringen. Um die typische Form eines solchen Produktes aufzuzeigen, wurde in [1] ein Referenzmodell vorgestellt (vergl. Bild 1).

Hierbei umfaßt der Begriff „technisches System“ die Fachgebiete Mechanik, Pneumatik, Hydraulik und Elektronik. Die Rolle der Informationstechnologische Komponente besteht in der intelligenten Steuerung des technischen Systems, wobei Sensorik und Aktorik das Bindeglied zwischen beiden Komponenten bilden. In [2] wurde gezeigt, daß das Zusammenwirken zwischen technischem System und der Software bereits in der Entwurfsphase simuliert werden kann.

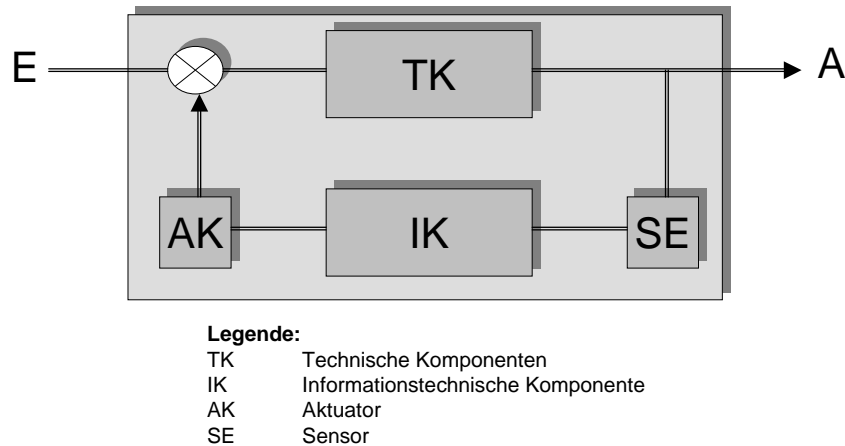


Bild 1: Referenzmodell eines mechatronischen Produkts nach [1].

### 3 Modellklassen

Der gesamte Konstruktionsprozeß eines mechatronischen Produkts besteht aus bilden, analysieren und verfeinern von Modellen. Dabei stellt sowohl die Modellerzeugung, als auch ihre Überführung in abstraktere oder konkretere Varianten eine mühsame Arbeit dar.

Während für den Entwurf verschiedenster technischer Systeme zahlreiche kommerzielle Entwurfssysteme verfügbar sind, die gleichzeitig eine Simulation der entstandenen Modelle ermöglichen, fehlen Werkzeuge zur Transformation von Modellen in andere Abstraktionsstufen gänzlich. Dabei sind es gerade die Informationen über gewählte oder verworfene Modellüberführungen, welche die Entwicklungshistorie im Sinne von Digital Mock-up darstellen.

#### 3.1 Abstrakte Modelle technischer Systeme

Abstrakte Modelle zeichnen sich dadurch aus, daß sie keinen konkreten physikalischen Effekt als Lösung einer Funktion bestimmen und somit keine Disziplin präferieren. Dieses Modell bietet deshalb eine ideale Ausgangsbasis für eine interdisziplinäre Entscheidung über das jeweilige Fachgebiet, aus dem die Lösung gewählt wird und stellt eine geeignete Kommunikationsgrundlage dar (vergl. [2]).

Das bekannteste Beispiel eines abstrakten Modells sind Blockdiagramme. Diese legen mathematische Beziehungen zwischen einzelnen Komponenten fest, beinhalten dabei aber keinerlei Informationen über Fachgebiete aus denen die späteren Lösungen stammen. Sie besitzen eine ziemlich universelle Vielfalt, abstrahieren aber vollkommen von physikalischen Grundlagen. Zwar können hierdurch auch nichttechnische Probleme, z.B. Bevölkerungswachstum abgebildet werden, aber im Falle der Konzeption eines mechatronischen Produkts, ist die Einschränkung auf physikalische Grundlagen gewollt. Hier bieten sich Bondgraphen als abstrakte Beschreibungssprache an, die konsequent auf den physikalischen Äquivalenzen der einzelnen Ingenieurwissenschaften basieren. Eine Verallgemeinerung von Flüssen und Kräften ermöglicht es Speicher für potentielle und kinetische Energie, Widerstände, Verstärker und Wandler zwischen Kräften und Flüssen allgemein zu definieren und handzuhaben. Eine detaillierte Beschreibung von Bondgraphen kann z.B. aus [3] entnommen werden.

### 3.2 Fachmodelle technischer Systeme

Im Gegensatz zu den abstrakten Modellen legen die Fachmodelle bereits ein konkretes Lösungsprinzip fest. Feder - Masse Modelle aus der technischen Mechanik und Schaltungen aus der Elektrotechnik sind Repräsentanten für diese Modellklasse. Fachmodelle existieren in unterschiedlichsten Detaillierungsgraden und Komplexitätsstufen, die je nach Fragestellung festgelegt werden muß. Nach Nomenklatur der Informatik wird diese Modellklasse auch als objektbasiertes Modell bezeichnet (vergl. Abschnitt 3.3).

### 3.3 Objektorientierte Modelle

Der Begriff der Objektorientierung stammt aus der Informatik und wird oftmals mißbräuchlich als objektbasiertes Modell verwendet. Nach [4] beinhaltet die Objektorientierung die Eigenschaften Identität, Klassifikation, Polymorphismus und Vererbung.

**Identität:** Anstatt der Eigenschaften von Objekten wird das Objekt selbst betrachtet.

**Klassifikation:** Für jedes Objekt besteht eine Mustervorlage.

**Polymorphismus:** Es gibt Funktionen, die für Objekte unterschiedlicher Mustervorlagen unterschiedliche Resultate erzielen.

**Vererbung:** Die Objektmuster sind hierarchisch gruppiert und untergeordnete Objektmuster beinhalten die Eigenschaften übergeordneter.

Identität und Klassifikation sind immer Bestandteil von Fachmodellen, dahingegen sind Polymorphismus und Vererbung nicht notwendigerweise erfüllt. Feder - Masse Modelle oder elektronische Schaltung erfüllen die Anforderungen für sich allein nicht und sollten somit nicht als objektorientiertes Modell bezeichnet werden. Im Gegensatz dazu ist das in Abschnitt 4 vorgestellte Modelltransformationssystem ein objektorientiertes Modell.

## 4 Modelltransformation

Abbildungen zwischen abstrakten und konkreten Modellen ist eine der Hauptaufgaben der Konstruktion. Die Notwendigkeit und die Eigenschaften beider Abbildungsrichtungen werden im folgenden aufgezeigt.

### 4.1 Vom abstrakten Modell zum Fachmodell

Dieser Vorgang entspricht dem normalen Prozeß der Synthese. Für einen abstrakten Sachverhalt wird eine konkrete Lösung gesucht. In der Regel sind mehrere Lösungen für ein Problem möglich. Deshalb ergibt sich eine Abbildung von einem Problem zu n Lösungsmöglichkeiten (Mächtigkeit 1:n).

### 4.2 Vom Fachmodell zum abstrakten Modell

Dieser Vorgang entspricht dem Prozeß der Analyse. Eine konkrete Lösung wird auf ihre Eigenschaften untersucht. Hieraus ergibt sich die Möglichkeit über Probleme und nicht über

Lösungen zu diskutieren. Für eine kreative Produktentwicklung ist dieser Schritt zwingend notwendig. Im abstrakten Modell darf es naturgemäß nur genau ein Äquivalent für das Fachmodell geben. (Mächtigkeit  $n:1$ ).

### 4.3 Anforderungen an ein Modelltransformationssystem

Aus den Übergängen zwischen konkretem und abstraktem Modell ergeben sich folgende Axiome für Modelltransformationen:

#### 1. Vollständigkeit

Zu jedem Sachverhalt, der im abstrakten Modell darstellbar ist, muß mindestens ein Fachmodell existieren, das den selben Funktionszusammenhang darstellen kann. Ohne diese Forderung wäre das Aufstellen des abstrakten Modells ohne Bedeutung.

#### 2. Abgeschlossenheit

Alles was in den Fachmodellen darstellbar ist, kann auch im abstrakten Modell dargestellt werden. Ein Verstoß gegen diese Eigenschaft würde eine Analyse und damit die Auswahl einer anderen Fachrichtung unmöglich machen.

**Definition:**  $T(A, \{F_i\}, R_a, R_k)$  ist genau dann ein Modelltransformationssystem wenn gilt:

A: abstraktes Modell

$F_i$ : Menge der Fachmodelle

$R_a(x)$ : Abstraktionsrelation es gilt:  $\forall x \in \{F_i\} : R_a(x) = A$

$R_k(x)$ : Konkretisierungsrelation es gilt:  $(x = a) \rightarrow R_k(x) \subseteq \{F_i\}$

$i$ : Anzahl der konkreten Modelle:  $i \geq 1$

Faßt man das aktuelle Modell als übergeordnete Klasse und die Fachmodelle als untergeordnete auf, so hat man eine Klassenhierarchie und auch Polymorphismen sind möglich. Somit stellt das Modelltransformationssystem ein objektorientiertes Modell dar.

## 5 Modelltransformation am Beispiel einer Lagerung

Für die Konstruktion eines Lagers soll eine Modelltransformation exemplarisch in beiden Richtungen vorgeführt werden. Die Anforderungen besteht darin eine Welle radial zu fixieren.

Das Wälzlager verkörpert eine mechanische Lösung, dessen Ersatzmodell als Masse mit angreifenden Kräften darstellbar ist. In Bild 2 befindet sich neben dem entsprechenden Bondgraphen auch eine Variante mit gleichem Verhalten. Hierbei wird deutlich, daß eine verallgemeinerte Kraft auch als gewandelter Fluß erzeugt werden kann. Ausgehend vom Bondgraphmodell soll nach diesem Analyseschritt nach einem geeigneten Erzeuger für Kraft bzw. Fluß und nach einem Gyrator gesucht werden. Ausgangspunkt hierfür ist die Tabelle 1, die Aufschluß über die gesuchten Größen in den jeweiligen Disziplinen gibt.

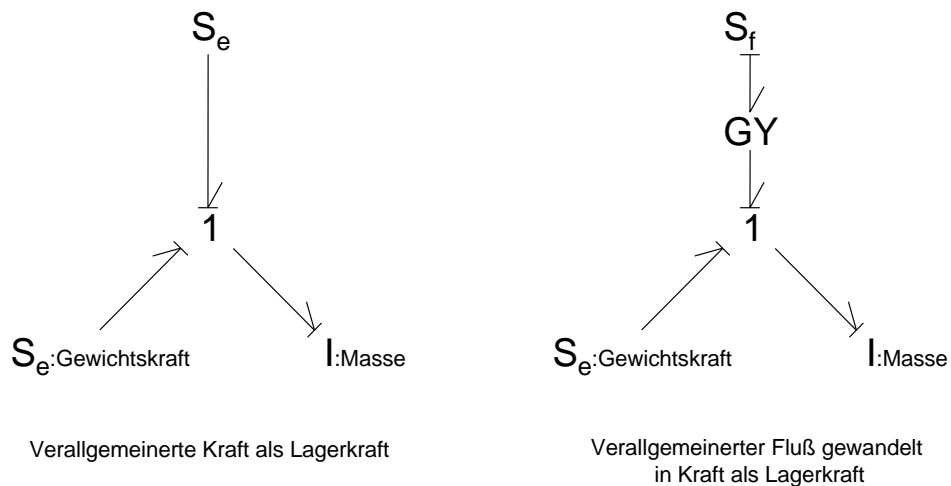


Bild 2: Bondgraphenmodell für Masse mit angreifenden Kräften.

Durch Auswahl des Druckes als pneumatische bzw. hydraulische Kraft ergibt sich die Lösung einer Luftlagerung oder einer Flüssiglagerung. Diese Kraft kann auch durch einen Volumenfluß erreicht werden, der in eine Kraft gewandelt wird. Aus der Disziplin der Elektrotechnik steht die Lösung der Spannung als Kraft bereit, für die Lagerung zwischen Kondensatorplatten müßte die Welle allerdings eine Ladung tragen. Auch mit mechanischen Kräften und Flüssen sind verschiedene Prinzipien möglich.

Disziplin	verallgemeinerte Kraft	verallgemeinerter Fluß	Beispiel für Gyrator
Mechanik (translatorisch)	Kraft	Geschwindigkeit	Masse
Mechanik (rotatorisch)	Drehmoment	Winkelgeschwindigkeit	Kreisel
Elektrotechnik	Spannung	Strom	Elektromagnet
Hydraulik	Druck	Volumenfluß	Antrieb
Pneumatik	Druck	Volumenfluß	Antrieb

Tabelle 1: Verallgemeinerte Kräfte, Flüsse und Wandler.

Im folgenden soll die Wahl des Stroms als verallgemeinerter Fluß und eines Elektromagnets als Gyrator detaillierter betrachtet werden. Dieses Prinzip ist als Magnetlagerung bekannt. Prinzip und Struktur sind aus [5] entnommen und in Bild 3 dargestellt. Das Prinzip der Magnetlagerung beinhaltet neben dem elektrischen Strom und dem Elektromagneten als Wandler noch eine Steuerung. Diese Steuerung soll in Form eines Mikroprozessors mit Software erfolgen. Außerdem kommen noch ein Bewegungssensor und ein Leistungsverstärker zum Einsatz.

Am Beispiel der Konzeption eines Magnetlagers wird deutlich, daß das gewonnene Fachmodell weiter verfeinert werden muß. Diese Verfeinerung kann nicht automatisch durchgeführt werden, sondern muß vom Konstrukteur vorgenommen werden.

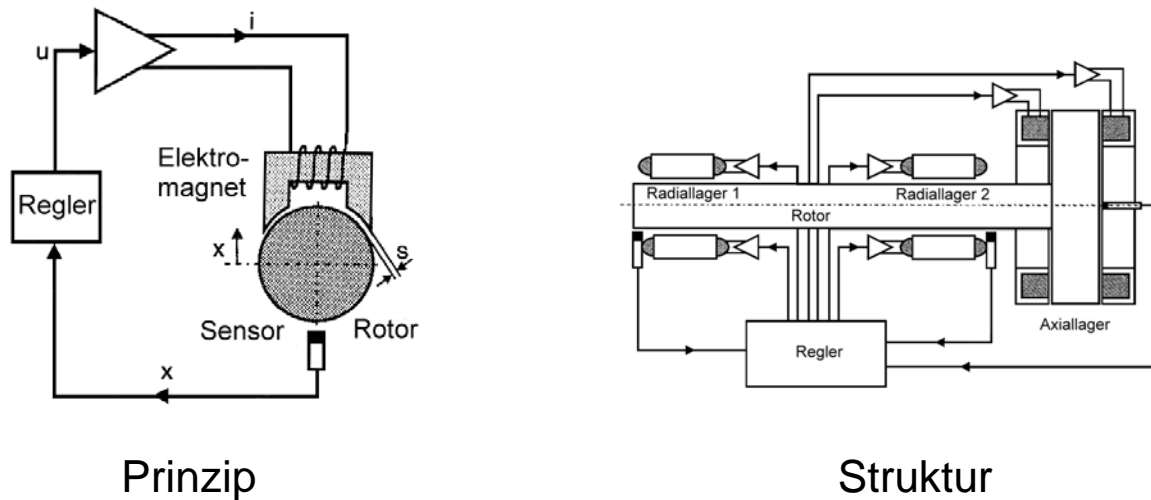


Bild 3: Prinzip und Struktur eines Magnetlagers nach [5].

## 6 Anforderungen an ein Werkzeug für Modelltransformationen

Eine detaillierte Betrachtung des obigen Beispiels ergibt einige Anforderungen an ein Werkzeug, das den Konstrukteur bei der Modelltransformation und damit bei der Synthese und Analyse in der Konzeptionsphase unterstützt. Eine der wichtigsten Anforderungen an jedes softwaretechnische Werkzeug besteht in der einfachen Handhabung. Eine PC basierte Lösung mit komfortabler intuitiver graphischen Oberfläche bietet beste Voraussetzung für die Akzeptanz eines solchen Werkzeugs. In Bild 4 ist ein Ausschnitt der bereits entwickelten graphischen Oberfläche mit der Modellierungsmöglichkeit für Fachmodelle dargestellt.

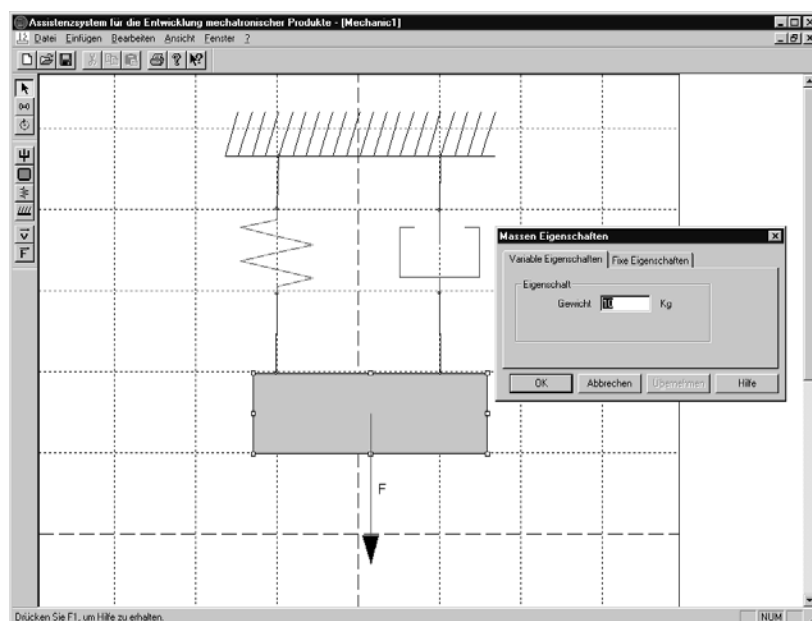


Bild 4: Modelltransformationssystem eines Assistentensystems für mechatronische Produkte

Eine Integration der Funktionalität in ein 3D-CAD System erscheint wenig sinnvoll. Der Konstrukteur soll sich weniger mit der Platzierung im Raum, als mit dem Problem an sich befassen. Um das Ergebnis geeignet weiterverwenden zu können, muß jedoch die gewonnene zweidimensionale Funktionsstruktur in eine topologische Funktionsstruktur [6] überführt werden. Für diesen Zweck bietet sich das Konstruktionssystem *mfk* [7] mit seinem semantischen relationsbasierten Produktmodell und seinen Analyse- und Synthesemöglichkeiten an.

Da bei mechatronischen Systemen mehrere ingenieurwissenschaftliche Disziplinen aufeinanderstoßen, ist eine kooperative Entwicklung zwischen oftmals räumlich verteilten Experten notwendig. Aus diesem Grunde muß das Werkzeug neben einer Sicht auf das Gesamtmodell Bearbeitung bzw. Hinzufügen von Teilmodellen ermöglichen. Als Schnittstellen für die jeweiligen Teilmodelle bieten sich 1-Junctions an, die anfänglich zu vereinbaren sind. Eine softwaretechnische Realisierung dieser Anwendung soll auf der DCOM (Distributet Component Object Model) Architektur aufgesetzt werden [8].

Ein Werkzeug für Modelltransformationen soll sowohl den Syntheseweg, als auch den Analyseweg unterstützen. Deshalb müssen Transformationen in beiden Richtungen möglich sein. Das automatisch generierte Analysemodell der Bondgraphen soll in einem geeigneten Simulationssystem weiterverarbeitet werden können. Im umgekehrten Fall müssen die möglichen Fachmodelle automatisch erzeugt werden.

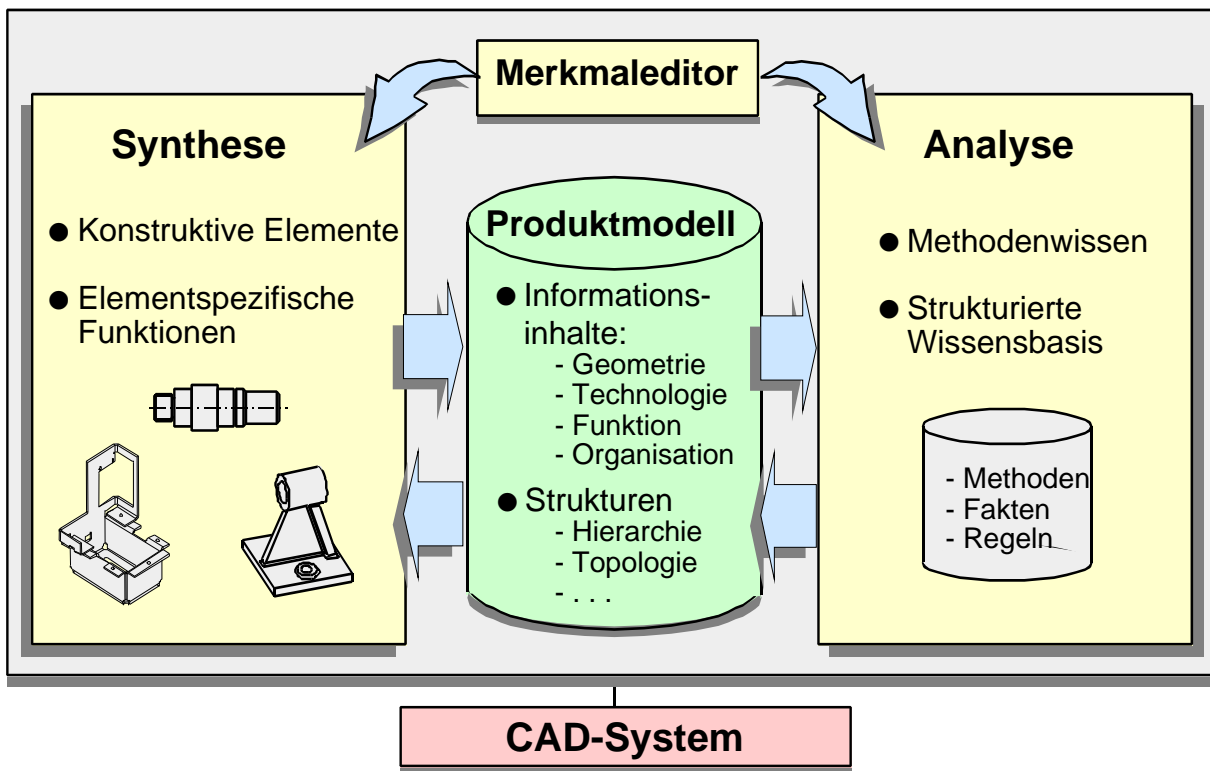


Bild 5: Konstruktionssystem *mfk* nach [8]

## 7 Zusammenfassung

Ein Modelltransformationssystem kann ein hilfreiches Werkzeug für einen Konstrukteur mechatronischer Produkte darstellen, um zwischen Fachmodellen den unterschiedlichen Disziplinen zu navigieren. Dieses Werkzeug ist im zweidimensionalen Bereich anzusiedeln, seine Ergebnisse müssen aber ins Dreidimensionale zu einer topologischen Funktionsstruktur übertragen werden können. Das Konstruktionssystem *mfk* bietet eine ideale Plattform, um die bestehenden Funktionsstrukturen auch mit Hilfe eines Expertensystems weiterzuverarbeiten.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Schweiger, W.; Schön, A. „Digital Mock-up bei der Entwicklung Mechatronischer Produkte“ in Tagungsband zum 8. Symposium Fertigungsgerechtes Konstruieren, Schnaittach, 1997.
- [2] Schön, A. „A Common Design Language For Developing Mechatronic Products“, Proceedings zu First CME Congress, Bremen 16.-19. Juni.
- [3] Karnopp, C.; Margolis, R.; Rosenberg, R. „System Dynamics – A Unified Approach“, John Wiley & Sons, Inc. 1990.
- [4] Rumbaugh, J. „Objectoriented Modeling and Design“, Prentice-Hall, 1997
- [5] Roddeck, W. „Einführung in die Mechatronik“, Teubner Verlag, 1997
- [6] Meerkamm, H.; Löffel, C; Bachschuster, S.: Wissensbasierte Lösungsfindung in der frühen Entwurfsphase durch Integration eines Expertensystems in ein 3D-CAD-System. VDI-Berichte Nr. 1217, S. 127-142, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995
- [7] Bachschuster, B. „Architektur und Konzept zur Realisierung eines produktspezifisch erweiterbaren Konstruktionssystems“, Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, 1997.
- [8] Eddon, G.; Eddon, H. „Inside Distributed COM“ Microsoft Press, 1998

Achim Schön  
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Martensstraße 9  
91058 Erlangen  
Tel: ++49 9131 / 85-27984  
Fax: ++49 9131 / 85-27988  
Internet: schoen@mfk.uni-erlangen.de