

KLASSIFIZIERUNG VON CAX-WERKZEUGEN FÜR DIE PRODUKTENTWICKLUNG AUF DER BASIS EINES NEUARTIGEN PRODUKT- UND PROZESSMODELLS

*Christian Weber und Horst Werner,
Universität des Saarlandes, Konstruktionstechnik/CAD*

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein neuartiger Ansatz zur Modellierung von Produkten und – darauf aufbauend, aber hier nicht vertieft betrachtet – von Produktentwicklungsprozessen vorgestellt. Dieser wird anschließend zur Charakterisierung und Klassifizierung von informationstechnischen Werkzeugen für den Entwicklungs-/Konstruktionsprozeß (CAX-Werkzeugen, -Systemen) herangezogen, um deren Einsatzmöglichkeiten sowie mögliche Weiter- und Neuentwicklungen besser beurteilen zu können.

1 Einleitung und Hintergründe

Am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD der Universität des Saarlandes (LKT) wurde ein neuartiger Ansatz zur Modellierung von Produkten und – darauf aufbauend – von Produktentwicklungsprozessen erarbeitet. Die wesentlichen Beweggründe, sich mit einem solchen Thema zu beschäftigen, waren

- eine gewisse Stagnation in der Weiterentwicklung der Konstruktionsmethodik bzw. Konstruktionswissenschaft (siehe hierzu die sehr tiefgehenden Ausführungen in [Fran-99]),
- die nach wie vor gegebene Zurückhaltung der Entwicklungs-/Konstruktionspraxis in bezug auf die Anwendung der Konstruktionsmethodik (siehe hierzu ebenfalls [Fran-99]),
- die immer noch sehr spärlichen Querbezüge zwischen der Konstruktionsmethodik/Konstruktionswissenschaft und der Entwicklung von informationstechnischen Werkzeugen für den Entwicklungs-/Konstruktionsprozeß – im folgenden sowie im Titel „CAX-Werkzeuge“ oder „CAX-Systeme“ genannt – [VaWe-00] sowie
- das damit im Zusammenhang stehende Dilemma, daß die Konstruktionsmethodik/Konstruktionswissenschaft sich kaum in die aktuelle Diskussion über die Inhalte von Produktmodellen im Rechner einmischt, daß dadurch andere die maßgeblichen Vorgaben treffen (z.B. Informatiker) und daß diese dann die Belange der Produktentwicklung/Konstruktion – hier werden immerhin die ersten Produktmodelldaten erzeugt! – nur sehr unzureichend berücksichtigen.

Absicht des neuen Ansatzes zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen ist es dementsprechend, einen Beitrag zur Minderung der vorstehend genannten Probleme zu leisten.

Im vorliegenden Papier können und sollen die theoretischen Hintergründe der neuen Betrachtungsweise sowie die (teilweise noch laufenden, bisher aber sehr ermutigenden) Untersuchungen darüber, inwieweit sich in bezug auf die Konstruktionsmethodik/Konstruktionswissenschaft neue Erkenntnisse ergeben, nicht im einzelnen dargestellt werden. Hierzu sind Veröffentlichungen an anderer Stelle geplant.

Vielmehr sollen nur diejenigen Aspekte zur Sprache kommen, die sich aus dem Ansatz in bezug auf die **Modellierung und Simulation von Produkten mit Rechnerunterstützung**

ergeben. Entsprechend wird der neue Ansatz auch nur so weit erläutert, wie dies zum Verständnis der diesbezüglichen Überlegungen erforderlich ist.

2 Neuer Ansatz zur Modellierung von Produkten

Der am LKT erarbeitete neue Ansatz zur Modellierung von Produkten und in der (hier nicht betrachteten!) Folge auch von Produktentwicklungsprozessen ist nicht etwas völlig Neues, sondern er baut auf der Lehre von Merkmalen (englisch: *characteristics*) und Eigenschaften (*properties*) auf. Eine wenn auch intuitive Vorstellung, was Merkmale und Eigenschaften von Produkten (oder von Gegenständen allgemein) sind, besitzt wohl jeder Produktentwickler. Das Thema wurde und wird aber auch immer wieder von Autoren aus dem Bereich Konstruktionsmethodik/Konstruktionswissenschaft behandelt¹ und spielt nicht zuletzt auch bei der Erfassung und Klassifizierung von Produktmerkmalen/-eigenschaften durch CAx-Systeme eine Rolle (z.B. [DIN-4000, ISO-13584]). In den genannten Quellen gibt es erhebliche Unterschiede bezüglich der begrifflichen Grundlagen (die zum Teil auch mit dem jeweiligen Zweck zusammenhängen), so daß man eigentlich nicht von **der** Merkmals-/Eigenschaftslehre sprechen kann, sondern den jeweiligen Kontext näher spezifizieren muß.

Für den Bereich der Produktentwicklung erscheint den Autoren die Grundlage nach [Hubk-73, Hubk-84, HuEd-92, HuEd-96, Andr-95] am geeignetsten zu sein. Danach kann man unterscheiden zwischen (hier wiedergegeben in der Wortwahl gemäß [Andr-95]):

- **Characteristics (Merkmale): Define the product.**
Addition by Weber/Werner: Can be directly determined by the designer.
- **Properties (Eigenschaften): Describe the product's behaviour.**
Addition by Weber/Werner: Can not be directly determined by the designer.

Die Merkmale (*characteristics*) entsprechen weitgehend dem, was in [Hubk-73, Hubk-84, HuEd-92, HuEd-96] „*internal properties*“ genannt wird, die Eigenschaften (*properties*) sind mit den dort „*external properties*“ genannten Kennzeichen eines Produktes verwandt². Ein weiterer Bezug ergibt sich zu [Suh-90], indem die Eigenschaften (*characteristics*) den „*design parameters*“ nach [Suh-90] entsprechen und die dort angesprochenen „*functional requirements*“ etwas ganz Ähnliches sind wie die hier betrachteten Eigenschaften (*properties*). Allerdings soll die von [Suh-90] vorgenommene Eingrenzung auf funktionale Eigenschaften und dann auch nur auf die geforderten hier ausdrücklich nicht gelten.

Den Kunden interessieren eigentlich nur die Eigenschaften eines Produktes; Aufgabe des Produktentwicklers/Konstrukteurs ist es, ausgehend von den vom Kunden geforderten/gewünschten Eigenschaften die Merkmale der Lösung festzulegen, welche diese Eigenschaften besitzt.

Wie kann man nun die Merkmale und die Eigenschaften, welche die wichtigste Basis des hier vorgestellten neuen Ansatzes zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen sind, weiter beschreiben und gliedern?

Hierzu zeigt zunächst **Bild 1** eine an der Erzeugnisstruktur eines Produktes orientierten Vorschlag zur Gliederung der Merkmale bzw. Merkmalsklassen (*characteristics, classes of characteristics*). Die Autoren glauben nicht, daß dies die einzig mögliche oder auch nur die für alle Betrachtungen sinnvollste Gliederung ist (z.B. könnte man sich für die frühen Phasen eine vielleicht viel nützlichere Gliederung nach Organen/Funktionsträgern anstatt nach Teilen

¹ Fast alle Autoren widmen sich dieser Frage, daher wird hier auf explizite Verweise verzichtet.

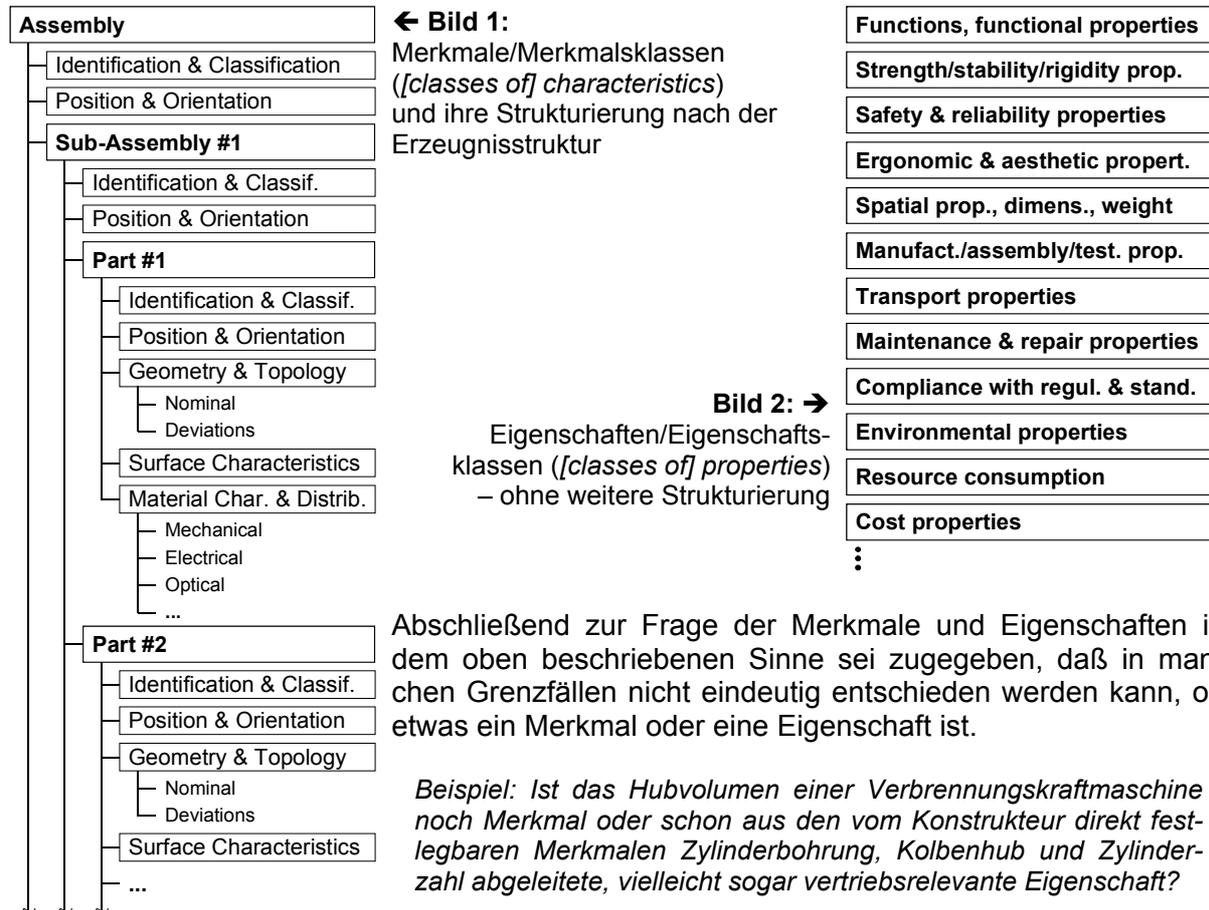
² Bei genauerer Betrachtung ergeben sich Detailunterschiede, die aber hier nicht diskutiert seien.

und Baugruppen vorstellen), jedoch ist die Bild 1 zugrunde liegende Struktur nicht nur in den Köpfen der Produktentwickler, sondern auch in CAx-Systemen weit verbreitet und bildet so eine geläufige Ausgangsbasis für die weiteren Untersuchungen.

In entsprechender Weise gibt **Bild 2** eine Liste der wichtigsten Eigenschaften/Eigenschaftsklassen (*properties, classes of properties*) von Produkten wieder. Auch diese Liste müßte weiter untergliedert werden. Jedoch vertreten die Autoren die Hypothese, daß jede weitere Untergliederung sowie im übrigen auch die Prioritäten/Gewichtungen der Eigenschaften produktgruppen-, häufig sogar unternehmensspezifisch ist.

Beispiel: Im Kraftfahrzeugbau würde man etwa die Eigenschaft „Sicherheit“ weiter in aktive und passive Sicherheit untergliedern. Unter „passiver Sicherheit“ könnte beispielsweise die Erfüllung der (standardisierten) Kriterien „Frontalaufprall ISO 3560“, „Heckaufprall ISO 3984“ usw. die nächste Gliederungsebene bilden. Für eine andere Produktgruppe, etwa für Kaffeemaschinen, wäre diese Untergliederung allerdings völlig unsinnig und müßte durch eine andere ersetzt werden.

In diesem Beitrag wird auf eine tiefgehende Diskussion der sinnvollen weiteren Untergliederung der Eigenschaften von Produkten verzichtet.



Diese Diskussion, die im übrigen alle diesbezüglichen Ansätze betrifft und die wohl auch einen Teil der zwischen ihnen feststellbaren Unterschiede erklärt, sei hier nicht weiter vertieft.

Bild 3 zeigt nun das auf diesen Begriffen aufbauende neue Basismodell für Produkte. Die hierin auftretenden Kürzel bezeichnen:

- C_i:** Characteristics (Merkmale)
P_j: Properties (Eigenschaften)

R_j : Relations (Beziehungen) between characteristics and properties
 EC_j : External conditions (äußere Bedingungen)

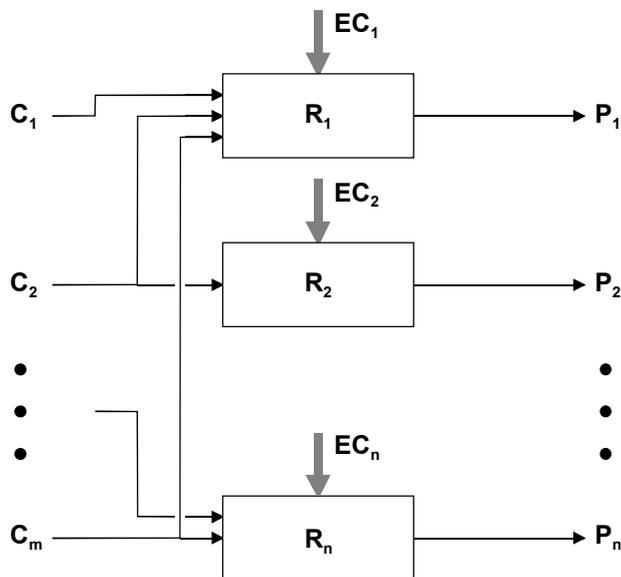


Bild 3: Basismodell – analytische Sicht

Als Beispiel kann man sich vorstellen, daß Merkmale (C_i) wie Geometrie, Werkstoff, Oberfläche eines Produktes dessen Eigenschaften (P_j) wie Funktion(sweise), Festigkeit, Aussehen (im Sinne von Ästhetik) und viele weitere bestimmen. Diese Eigenschaften sind nur im Kontext bestimmter äußerer Bedingungen (EC_j) sinnvoll zu beurteilen, z.B. die Funktion vor dem Hintergrund bestimmter Nutzungs-/Nutzerprofile, die Festigkeit auf der Grundlage eines Betriebs-/Zeit-/Dauerfestigkeitsnachweises, „schönes Aussehen“ mit Blick auf bestimmte Modetrends und/oder kulturelle Eigenheiten der Kunden.

Einem fertigen Produkt haften – jeweils betrachtet vor dem Hintergrund bestimmter äußerer Bedingungen (EC_j) – bestimmte Eigenschaften (P_j) einfach an („in Nordamerika findet man das Auto xyz eben einfach ‚rassig‘“). In vielen Fällen lassen sich diese – intuitiv oder in irgendeiner Weise formalisiert – auch auf bestimmte Merkmale (C_i) des Produktes zurückführen („... dieser Hüftschwung!“). Ein allgemeines, zumindest auf eine möglichst weitgehende Formalisierung abzielendes Modell des Zusammenhanges zwischen Merkmalen und Eigenschaften wird in Bild 3 durch die als Kästen eingetragenen Beziehungen (R_j) repräsentiert. Im einfachsten Ansatz gibt es für jede Eigenschaft (P_j) gerade eine Beziehung bzw. einen „Kasten“ (R_j), in den aber jeweils ein Teil aller Produktmerkmale (C_i) eingeht.

Im Entwicklungsprozeß, wenn das Produkt noch gar nicht real vorhanden ist, will und muß man auf der Basis der zum jeweiligen Zeitpunkt bereits festliegenden Merkmale schon möglichst genaue Aussagen (Vorhersagen!) über dessen Eigenschaften treffen können. Hierzu stehen – quasi als Realisierungsmöglichkeiten für die Beziehungen R_j – prinzipiell folgende Methoden zur Verfügung (von denen sicher nicht alle für alle Eigenschaften geeignet sind):

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Intuition, grobe Abschätzung • Erfahrung • Befragung von Testpersonen/Kunden • (Physikalische) Experimente³ mit <ul style="list-style-type: none"> – Modellen, Funktions-/Labormustern – einzelnen Komponenten – (vollständigen) Prototypen | <ul style="list-style-type: none"> • Tabellen, Diagramme (sozusagen verallgemeinerte Erfahrung und/oder verallgemeinerte Ergebnisse von Experimenten) • Berechnung und Simulation mit <ul style="list-style-type: none"> – „Fuzzy“-Methoden, neuronalen Netzen – konventionellen, meist auf vereinfachten Modellen beruhenden Ansätzen – numerischen Methoden und Rechnerunterstützung |
|---|--|

Im Einzelfall können sich Methoden zur Bestimmung von Eigenschaften stark dadurch voneinander unterscheiden, welche und wie viele Merkmale schon bekannt sein müssen, um die Methode anwenden zu können. Dementsprechend können bestimmte Methoden im Entwick-

³ Hierbei besteht ein besonderes Problem darin, an Modellen, einzelnen Komponenten, aber wegen der verkürzten Zeit durchaus auch bei Prototypen die dem späteren realen Einsatz entsprechenden äußeren Bedingungen (EC_j nach Bild 3) korrekt nachzuempfinden. Hierauf sei nicht eingegangen.

lungsprozeß relativ früh eingesetzt werden (wenn sie nur wenige Merkmale als „Input“ benötigen) oder sind späteren Phasen vorbehalten (wenn [fast] alles schon bekannt sein muß). Es ist daher kein Wunder, wenn es zur Bestimmung der gleichen Eigenschaft ganz unterschiedliche Methoden gibt und diese auch benutzt werden (müssen), etwa bei der Festigkeitsrechnung die Erstsemesterformel $\sigma_b = M_b/W_b \leq \sigma_{zul}$ genauso wie eine FEM-Simulation.

Diese – hier nicht weiterverfolgten – Überlegungen schließen sich eng an die vor einigen Jahren auf dem Symposium „Fertigungsgerechtes Konstruieren“ vorgestellte Strukturierung der Berechnungsverfahren mit Hilfe des sogenannten Verfahrensraumes an [Schw-97].

Gleichzeitig ist die Frage, über welche Eigenschaft(en) eine Methode Auskunft gibt und welche/wie viele Merkmale schon bekannt sein müssen, damit sie angewendet werden kann, eigentlich das ausschließliche Kriterium, das den weiteren Untersuchungen dieses Beitrages zugrunde liegt. Dabei erfolgt zudem eine Beschränkung auf CAx-Systeme, also nur auf **informationstechnische Methoden**.

3 Ergänzungen und Formalisierung des Basismodells

Bevor auf die Modellierung von Produkten mit Rechnern bzw. Software näher eingegangen wird und dann die darauf aufbauende Klassifizierung von CAx-Werkzeugen erfolgt, seien zwei Ergänzungen zu dem Basismodell nach Bild 3 nachgetragen:

- Neben den beabsichtigten/geforderten und/oder den im Rahmen des Entwicklungsprozesses betrachteten Eigenschaften gibt es in der Regel weitere, zusätzliche Eigenschaften eines Produktes. Dies sind häufig störende Eigenschaften („Störeffekte“, Beispiele: Leistungsverluste, Geräusche in Zahnradgetrieben); es ist aber auch denkbar, daß sie indifferent sind (dann werden sie in der Regel gar nicht betrachtet, weshalb an dieser Stelle auch die Beispiele fehlen!) oder sich sogar positiv auswirken (Beispiel: wegen Korrosionsschutz eingeführte Oberflächenbeschichtung hat auch noch ästhetische Vorzüge). Diese zusätzlichen Eigenschaften lassen sich in dem Modell nach Bild 3 auf die gleiche Art wie alle anderen Eigenschaften letztlich mittels bestimmter Beziehungen – in diesem Falle: **zusätzliche Beziehungen** (*additional relations*) – auf die Merkmale des Produktes zurückführen. Um sie von den beabsichtigten/geforderten bzw. den ohnehin berücksichtigten Eigenschaften (P_j) bzw. die ihnen zugrunde liegenden Beziehungen von den „normalen“ Relationen (R_j) zu unterscheiden, werden sie mit dem Zusatzindex „+“ separat gezählt (P_{+k} bzw. R_{+k}) und graphisch hellgrau hinterlegt. Ansonsten lassen sie sich völlig ohne weitere Modifikationen in das Basismodell nach Bild 3 einbauen (**Bild 4**).
- Gewissermaßen auf der „Merkmalsseite“ des Basismodells nach Bild 3 bestehen in der Regel zahlreiche Beziehungen/Abhängigkeiten/„Constraints“ (**innere Beziehungen**, *internal relations*). In Form geometrischer Beziehungen sind diese jedem Produktentwickler geläufig (Beispiel: Nenndurchmesser der Welle gleich Nenndurchmesser des an dieser Stelle befestigten Lagerinnenrings) und können heute mittels parametrischer CAx-Systeme vom Rechner erfaßt, ausgewertet und verwaltet werden. Es gibt aber durchaus auch nicht-geometrische Abhängigkeiten dieser Art (Beispiel: Werkstoffpaarung), selbst wenn diese oft nicht explizit dokumentiert werden. Diese inneren Beziehungen (*internal relations*, IR_{xi}) können in dem hier betrachteten Modell wie in **Bild 5** gezeigt berücksichtigt werden, wobei sie zur besseren Unterscheidung dunkelgrau hinterlegt sind.

Als nächstes ist noch darauf hinzuweisen, daß sich das Basismodell nach Bild 3 – mit oder ohne die Ergänzungen entsprechend den Bildern 4 und 5 – mathematisch formalisieren läßt. Eine Möglichkeit, die sich an die Überlegungen nach [Suh-90] anlehnt, ist die folgende:

$$\underline{\mathbf{P}} = \underline{\mathbf{R}} \otimes \underline{\mathbf{C}}$$

(Gl. 1)

Hierin bedeuten:

- C**: Characteristics vector (Merkmalsvektor)
- P**: Properties vector (Eigenschaftsvektor)
- R**: Relations matrix (containing functions of characteristics to model each property!)
- \otimes : "Some sort of connection" (not just a matrix/vector multiplication!)

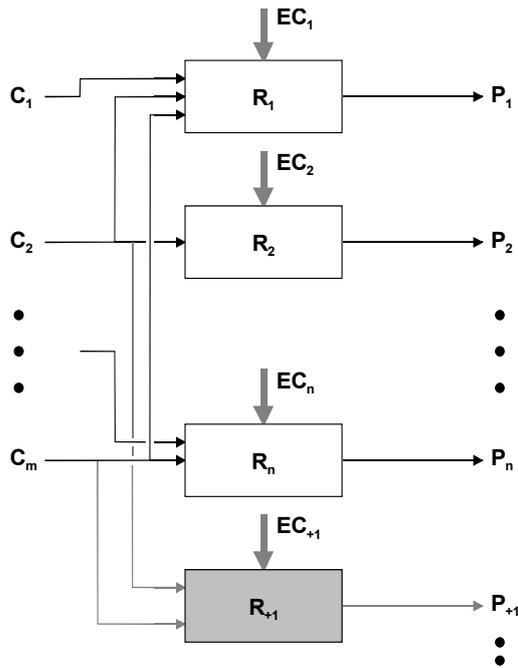


Bild 4: Zusätzliche Beziehungen (*additional relations*) zwischen Merkmalen und (zusätzlichen) Eigenschaften

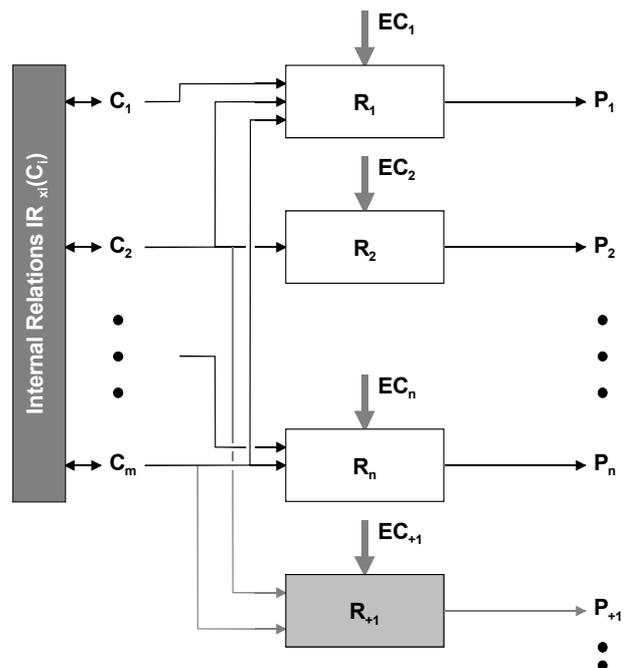


Bild 5: Innere Beziehungen (*internal relations*) zwischen verschiedenen Merkmalen (Abhängigkeiten, „Constraints“)

Eine andere, anschaulichere Variante der Formalisierung des Basismodells ist die nebenstehende explizite Matrixdarstellung (**Tabelle 1**). Jede (Einzel-) Funktion F_{ji} bzw. F_{+ki} zeigt, in welcher Weise das Merkmal C_i die Eigenschaft P_j bzw. die zusätzliche Eigenschaft P_{+k} beeinflusst. Einzelne Funktionen F_{ji} bzw. F_{+ki} können dabei gleich Null sein (kein Einfluß).

Die Matrix beantwortet zeilenweise die Frage: „Welche Merkmale beeinflussen wie die in der betreffenden Zeile repräsentierte Eigenschaft?“ Spaltenweise läßt sich daraus ablesen: „Welche Eigenschaften werden wie von dem in der betreffenden Spalte erfaßten Merkmal beeinflusst?“

	C₁	C₂	...	C_m
P₁	F_{11}	F_{12}	...	F_{1m}
P₂	F_{21}	F_{22}	...	F_{2m}
⋮	⋮			⋮
P_n	F_{n1}	F_{n2}	...	F_{nm}
P₊₁	F_{+11}	F_{+12}	...	F_{+1m}
P₊₂	F_{+21}	F_{+22}	...	F_{+2m}
⋮	⋮			⋮
0	IR_{11}	IR_{12}	...	IR_{1m}
0	IR_{21}	IR_{22}	...	IR_{2m}
⋮	⋮			⋮

Tabelle 1: Formalisierte (Matrix-/Tabellen-) Darstellung des Basismodells nach Bild 3

Über die (zusätzlichen) Eigenschaften hinaus kann die vorgeschlagene Matrixdarstellung auch die inneren Beziehungen zwischen Merkmalen (*internal relations*, \mathbf{IR}_{xi}) mit enthalten. Es ist lediglich zu beachten, daß diese formal gewissermaßen einer leeren Eigenschaft („0“) entsprechen⁴.

4 Synthetische Sicht

Das Basismodell zur Modellierung von Produkten gemäß Bild 3 sowie auch die betrachteten Erweiterungen nach den Bildern 4 und 5 repräsentieren eine **analytische Sichtweise**: Aus gegebenen (bekannten!) Merkmalen, die ein Produkt beschreiben, wird auf dessen Eigenschaften geschlossen.

Die **synthetische Sichtweise** ergibt sich aus der Umkehrung des vorstehenden Satzes: Aus vorgegebenen (geforderten/gewünschten) Eigenschaften, die ein Produkt haben soll, sind dessen beschreibende Merkmale zu bestimmen.

Bild 6 erläutert die synthetische Sicht graphisch, indem gegenüber dem analytisch orientierten Basismodell gemäß Bild 3 nun „nur“ alle Pfeilrichtungen umzukehren sind (außer bei den äußeren Bedingungen $[\mathbf{EC}_j]$, für die das nur in bestimmten, hier nicht dargestellten Fällen gilt). In entsprechender Weise müssen im Falle der synthetischen Sicht zwischen den Eigenschaften (\mathbf{P}_j), die nun die „Inputs“ sind, und den Merkmalen (\mathbf{C}_i) als „Outputs“ gegenüber dem analytischen Fall nun quasi „inverse“ Beziehungen (\mathbf{R}_j^{-1}) berücksichtigt werden⁵.

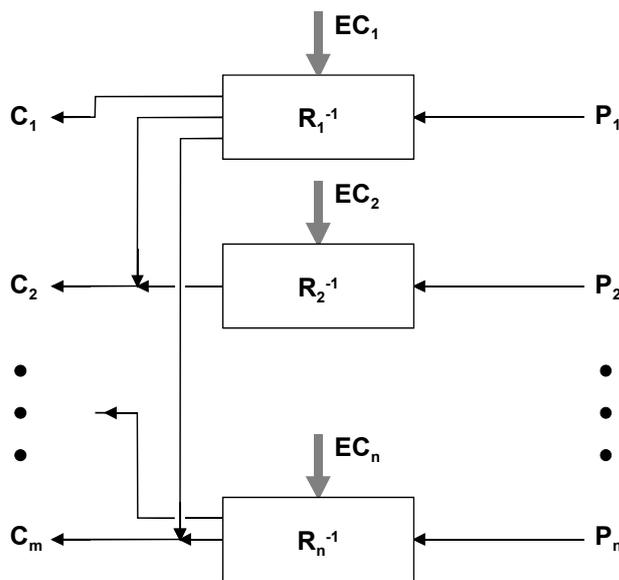


Bild 6: Basismodell – synthetische Sicht

Der Produktentwicklungsprozeß läßt sich auf dieser Basis nun als ein in der groben Richtung („strategisch“) dem Modell nach Bild 6 folgender, im „taktischen Ablauf“ aber zwischen der Synthese nach Bild 6 und der Analyse nach Bild 3 hin- und herwechselnder Vorgang modellhaft darstellen. Auch läßt sich ein von der „klassischen“ Konstruktionsmethodik (z.B. nach [VDI-2221]) deutlich verschiedenes Regelwerk hierfür formulieren, wobei es aber problemlos gelingt, deren Erkenntnisse und Regeln mit einzubeziehen.

Hierüber kann und soll im vorliegenden Beitrag, dessen Fokus ein anderer ist,

nicht ausführlich diskutiert werden. Um die Überlegungen abzurunden, sei – genau wie das weiter oben für die analytische Sicht geschehen ist – nur ein kurzer Blick auf die grundsätzlichen Methoden (auf die „inversen“ Beziehungen bzw. *relations* \mathbf{R}_j^{-1}) geworfen, die zur Bewältigung eines synthetisch orientierten (Teil-) Prozesses gemäß Bild 6 zur Verfügung stehen,

⁴ Ein Mathematiker würde sicher vorschlagen, mit solchen „Nullzeilen“, die ja gerade die gegenseitigen Abhängigkeiten von Merkmalen repräsentieren, Spalten aus der Matrix zu eliminieren. Aber in der Produktentwicklung erscheint es oft interessant und sinnvoll, solche Abhängigkeiten sichtbar zu machen!

⁵ Es handelt sich sicher nicht um inverse Beziehungen im exakten Sinne (dann wäre die Produktentwicklung auch eine vergleichsweise einfache Aufgabe!). Auch ist zu fragen, welche Beziehungen überhaupt „invertiert“ werden können, unter welchen Bedingungen dies möglich ist usw. Diese und weitere äußerst interessante Fragen können im vorliegenden Beitrag nicht angesprochen werden.

die also von vorgegebenen Eigenschaften (Verhaltensweisen) eines Produktes zu den produktbeschreibenden Merkmalen führen können:

- Menschlicher Genius⁶
 - Assoziation
 - zu technischen „Mustern“
 - zu „Mustern“ aus der Natur (Bionik)
 - Erfahrung
 - Standard-/Kataloglösungen (z.B. Maschinenelemente)
- Regelwerke
 - Methodische/systematische Ansätze
 - Inverse Berechnungen
 - Informationstechnische Werkzeuge
 - Strukturoptimierung, genetische Algorithmen
 - Neuronale Netze
 - ... (weitere?) ...

5 Rechnerunterstützte Produktmodellierung

Will man Produkte mit Rechner- bzw. Softwareunterstützung modellieren, so bedeutet dies auf der Grundlage der vorangegangenen Ausführungen nichts anderes, als daß die Beziehungen (R_j) in dem Basismodell nach Bild 3 (bzw. im synthetischen Fall nach Bild 6: die „inversen“ Beziehungen R_j^{-1}) mit Hilfe von Programm(system)en realisiert werden. Wenn **alle** relevanten (!) Beziehungen durch solche Programme realisiert wären, hätten wir es mit einem „vollständig virtuellen Produkt“ zu tun, auf dessen Verwirklichung sich gerade zur Zeit ja erhebliche Anstrengungen konzentrieren⁷.

Bevor im nachfolgenden Abschnitt 6 bekannte CAx-Systeme unter diesem Blickwinkel näher untersucht werden, ist an dem Basismodell nach Bild 3 jedoch noch eine Ergänzung anzubringen, die (nur) im Zusammenhang mit der rechnerunterstützten Produktmodellierung interessant ist: Als weiteres Element neben den Merkmalen (C_i), den Eigenschaften (P_j) und den äußeren Bedingungen (EC_j) ist hierbei zu berücksichtigen, welche **Modellierungsbedingungen** (*modelling conditions*, MC_j) dem betreffenden Programm(system) zugrunde liegen (**Bild 7**). Andernfalls könnte das vom Programm ermittelte Ergebnis bezüglich der Plausibilität überhaupt nicht eingeschätzt werden.

Beispiel: Die Berechnung der Festigkeitseigenschaften (P_j) mit Hilfe eines FEM-Systems führt bei gleicher Geometrie und gleichem Werkstoff (C_i) sowie bei identischen äußeren Beanspruchungen und identischem Versagenskriterium (EC_j) zu völlig anderen Ergebnissen, je nachdem, mit welchem Elementtyp gearbeitet und wie vernetzt wird (MC_j). Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, daß „Elementtyp“ und „FEM-Netz“ eben nicht zum Produkt oder seinen Einsatzbedingungen gehören, sondern ausschließlich mit dem Modellersystem bzw. seiner Verwendung zusammenhängen.

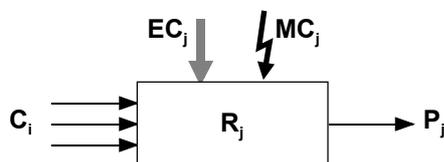


Bild 7:
Berücksichtigung der Modellierungsbedingungen (*modelling conditions*, MC_i) bei der **rechnerunterstützten** Produktmodellierung (hier: analytische Sicht)

⁶ Es scheint vieles – vor allem die neueren gemeinsamen Untersuchungen von Konstruktionswissenschaftlern und Denkpsychologen – darauf hinzudeuten, daß das, was man gemeinhin als Genius/Genie empfindet, im wesentlichen auf (vielleicht besonders schnelle und auf ein besonders reichhaltiges Reservoir an „Mustern“ zurückgreifende) Assoziation zurückzuführen ist.

⁷ Die Frage, ob das (mehr oder weniger vollständige) virtuelle Produkt besser aus vielen einzelnen Programmen zur Realisierung jeweils einer einzigen Beziehung R_j/R_j^{-1} oder besser aus einem einzigen Block zur Repräsentation aller (relevanten) Beziehungen ($\Sigma R_j/\Sigma R_j^{-1}$) bestünde, sei hier nicht diskutiert.

Bild 7 eröffnet ein weiteres interessantes Diskussionsfeld, das hier ebenfalls nicht erschöpfend behandelt werden kann, das mit Blick auf die eingangs kritisierte Zurückhaltung der Konstruktionsmethodik/Konstruktionswissenschaft auf dem Gebiet der Inhalte von Produktmodellen aber dennoch kurz angerissen werden soll: Es handelt sich um die Frage, aus welchen der an die Relation R_j nach Bild 7 angetragenen Elementen ein Produktmodell eigentlich besteht oder bestehen sollte. Hierzu gibt **Tabelle 2** einige Alternativen mit stichwortartigen (im Interesse der Kürze stark pointierten) Anmerkungen wieder.

Bestandteil Produktmodell:	Bemerkung:
<ul style="list-style-type: none"> • Produktmerkmale (C_i) • Äußere Bedingungen (EC_j) 	Die Antwort des theoretischen Wissenschaftlers: Alles andere ist im Prinzip ableitbar – aber leider nicht eindeutig reproduzierbar.
<ul style="list-style-type: none"> • Produktmerkmale (C_i) • Produkteigenschaften (P_j) (= Ergebnisse) 	Die Antwort des Praktikers (1): Alles, was man wissen muß; wie die Ergebnisse entstanden sind, ist egal, und wofür/wogegen überhaupt gerechnet wurde, interessiert nachher sowieso niemanden mehr.
<ul style="list-style-type: none"> • Produktmerkmale (C_i) • Äußere Bedingungen (EC_j) • Produkteigenschaften (P_j) (= Ergebnisse) 	Die Antwort des Praktikers (2): Alles, was man wissen muß; wie die Ergebnisse entstanden sind, ist egal.
<ul style="list-style-type: none"> • Produktmerkmale (C_i) • Äußere Bedingungen (EC_j) • Modellierungsbedingungen (MC_j) 	Korrekte wissenschaftliche Antwort (?): Ergebnisse sind eindeutig reproduzierbar – müssen aber immer wieder neu erstellt werden, wenn man sie braucht.
<ul style="list-style-type: none"> • Produktmerkmale (C_i) • Äußere Bedingungen (EC_j) • Modellierungsbedingungen (MC_j) • Produkteigenschaften (P_j) (= Ergebnisse) 	Die Antwort des Vorsichtigen: Lieber alles aufheben, was man bekommen kann – schon aus Gründen der Produkthaftung.

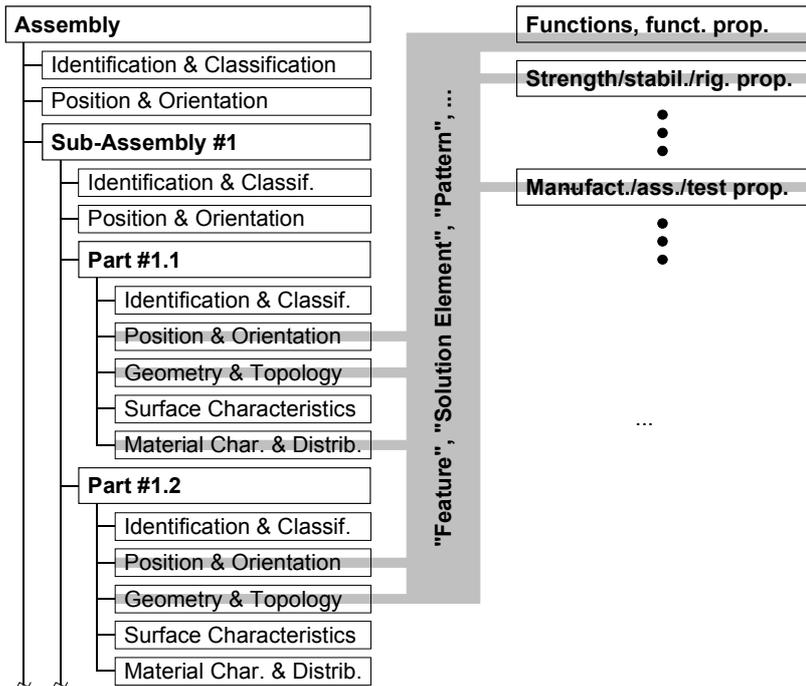
Tabelle 2: Mögliche Inhalte von Produktmodellen

Ein weiterer Problempunkt, der gar nicht weiter angesprochen werden soll, ergibt sich noch daraus, daß Fälle bekannt geworden sind, in denen verschiedene Programme oder sogar verschiedene Versionen des gleichen Programms unterschiedliche Ergebnisse (unterschiedliche Eigenschaften P_j) ermittelt haben, obwohl identische Produktmerkmale (C_i), identische äußere Bedingungen (EC_j) und identische Modellierungsbedingungen (MC_j) in sie hineinsteckt wurden. Müßte man also eigentlich auch noch die verschiedenen Programme/Programmversionen selbst (R_j) im Produktmodell aufbewahren?

Schließlich sei vor dem Hintergrund des in diesem Beitrag vorgestellten neuen Ansatzes zur Modellierung von Produkten noch auf die sogenannte Feature-Technologie eingegangen. Features – aber auch verwandte bzw. erweiterte Ansätze wie „gadgets“ [FrPS-94, FrLu-99], „(funktional-) technische Elemente“ [KIZe-98], „Konstruktionsobjekte“ [WeWe-98a, WeWe-98b] und andere – fügen sich in das Konzept als vordefinierte, für den Rechner aufbereitete „Muster“ (*patterns*) ein, welche eine Kombination aus bestimmten Merkmalen und Eigenschaften enthalten und miteinander verknüpfen.

Bild 8: Features (und andere Elemente) als vordefinierte und für den Rechner aufbereitete Verknüpfungen zwischen Merkmalen und Eigenschaften

Bild 8 erläutert dies exemplarisch: Das schematisch dargestellte Feature erfaßt auf der Seite der Merkmale (entsprechend Bild 1 nach der Erzeugnisstruktur gegliedert) jeweils einen Teil der Positionierungs-/Orientierungsparameter, der Geometrie sowie der Werkstoffeigenschaften. An Eigenschaften enthält es jeweils einen Teil der funktionalen Kriterien, der Festigkeits- und der Herstellungseigenschaften. Ein Beispiel wären etwa die in [ScSt-94] betrachteten Design Features. Wie in Bild 8 gezeigt, können diese Zusammenhänge teileübergreifend sein (müssen es manchmal sein, z.B. Features für Konstruktion oder Montage).



Die von der FEMEX-Gruppe erarbeitete Feature-Definition ([Webe-96], auch in [VDI-2218]) braucht entsprechend dem neuen, exakteren Konzept nur unwesentlich modifiziert (präzisiert) zu werden⁸ (nachstehend durch Fettschrift bzw. Streichung gekennzeichnet):

*A feature is an information element which represents a region of interest within one or more product(s). A feature is described by an aggregation of **characteristics and properties** of a product. ...*

Features und andere „Muster“ gemäß Bild 8 können nun, wenn sie in entsprechender Weise informationstechnisch aufbereitet werden, wahlweise in zwei Richtungen benutzt werden:

- Entweder wird ausgehend von bestimmten Merkmalen des Entwurfes auf diesen zugeordnete Eigenschaften geschlossen (**Analyse**, in der Sprache der Feature-Technologie „*feature recognition*“),
- oder es werden bestimmten vorgegebenen Eigenschaften zugeordnete Lösungsmerkmale vom Programm automatisch festgelegt (**Synthese** bzw. „*feature-based modelling*“).

Im zweiten Fall ist allerdings zu bedenken, daß es sich nur um einen eingeschränkten Synthesebegriff handelt: Es können mit diesem Konzept lediglich bekannte Zusammenhänge zwischen (bekannten/vordefinierten) Eigenschaften und (bekannten/vordefinierten) Merkma-

⁸ FEMEX (**Feature Modelling Experts**) ist eine internationale und interdisziplinäre Arbeitsgruppe aus Forschern und Entwicklern, die im Bereich der Feature-Technologie arbeiten. Daß die in diesem Beitrag vorgestellten Überlegungen relativ dicht an den Resultaten der FEMEX liegen, ist natürlich kein Zufall: Die Mitarbeit in der FEMEX war ein wesentlicher Auslöser, daß die Autoren die Überlegungen fortgeführt und die hier vorgestellten Ergebnisse erarbeitet haben.

len reproduziert und geschickt ausgenutzt werden⁹. „Reine Synthese“, d.h. die Erzeugung vorher überhaupt nicht bekannter Merkmale, womöglich noch aufgrund neuer (bei der Erstellung des Programms nicht vorausgedachter) Eigenschaften, ist nicht möglich.

6 Klassifizierung von CAX-Werkzeugen für die Produktentwicklung

Aufbauend auf den bisherigen Ausführungen geht es – wie bereits weiter oben (am Ende von Abschnitt 2) angemerkt – bei der rechnerunterstützten Produktmodellierung eigentlich nur um folgende Fragen:

1. Über welche Eigenschaft(en) (P_j) eines Produktes gibt ein Programm(system) Auskunft?
2. Welche und wie viele Merkmale (C_i) müssen schon bekannt sein, damit das Programm(system) überhaupt eingesetzt werden kann und verlässliche Ergebnisse liefert?

Während die vorstehenden Fragen streng genommen für jede Methode gelten (mit oder ohne Computer), kommt für rechnerunterstützte Methoden noch folgende Frage hinzu (Bild 7):

3. Welche Modellierungsbedingungen (MC_j) liegen dem betrachteten Programm(system) zugrunde?

Die vorstehenden Fragen 1 und 2 sind zunächst für den analytischen Fall formuliert (Bild 3). Für die synthetische Sicht (Bild 6) müßte die Rolle von Merkmalen und Eigenschaften vertauscht werden (welche Merkmale kann ein Programm[system] festlegen und auf der Basis welcher vorgegebenen Eigenschaften?). Im synthetischen Fall kommt aber noch eine weitere, allgemeinere Frage hinzu:

4. Unter welchen Bedingungen und in welchem Umfang kann ein Programm(system) überhaupt Syntheseprobleme bearbeiten (Realisierung „inverser“ Beziehungen R_j^{-1})?

In der nachfolgenden **Tabelle 3** sind nun die wichtigsten im Entwicklungs-/Konstruktionsprozeß eingesetzten CAX-Werkzeuge aufgeführt und entsprechend den vorstehenden Kriterien grob klassifiziert¹⁰:

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • CAD-Systeme (konventionell) • CAD-Systeme (parametrisch) • CAD erweitert um VR-/DMU-Komponenten | <ul style="list-style-type: none"> • FEM-Systeme als „typischer“ Stellvertreter für numerische Berechnungssoftware (andere Beispiele etwa MKS oder CFD) • EDM/PDM-Systeme |
|---|---|

Zur Veranschaulichung sind im Ordnungsteil von Tabelle 3 links die Merkmalsklassen und rechts die relevanten Eigenschaftsklassen aufgelistet. (Die eigentlich separat zu untersuchenden inneren Beziehungen/Abhängigkeiten zwischen Merkmalen [IR_{xi}] werden der Übersichtlichkeit halber wie eine weitere Merkmalsklasse behandelt.) Die grauen Hinterlegungen zeigen nun – in der Art eines Balkendiagramms –, ob und inwieweit das betreffende Programm(system) die jeweilige Merkmals-/Eigenschaftsklasse erfaßt. Insgesamt ergibt sich da-

⁹ Eine noch weitergehende Einschränkung ergibt sich, wenn es um die bloße Quantifizierung von (bekannten/vordefinierten) Merkmalen aufgrund von variierenden Quantitätsangaben der (ebenfalls bekannten/vordefinierten) Eigenschaften geht (siehe die Ausführungen am Ende dieses Abschnittes).

¹⁰ Erläuterung der Abkürzungen: CAD – Computer Aided Design. VR – Virtual Reality. DMU – Digital Mock-up. FEM – Finite-Elemente-Methode. MKS – Mehrkörper-Simulation. CFD – Computational Fluid Dynamics. EDM/PDM – Engineering/Product Data Management.

durch für jede Systemklasse ein charakteristisches „Profil“ der jeweils abgedeckten Merkmale und Eigenschaften.

In der Mitte zwischen der Merkmals- und der Eigenschaftsliste stehen jeweils Hinweise zu den Modellierungsbedingungen, die der betrachteten CAx-Systemklasse zugrunde liegen oder – falls es mehrere Alternativen gibt – zugrunde liegen können.

Es handelt sich ganz sicher nicht um quantitativ exakte Untersuchungsergebnisse, sondern es soll lediglich systemneutral und entsprechend dem aktuellen Stand der Anwendungspraxis (nicht der Forschung/Entwicklung!) für die betreffende Systemklasse die generelle Tendenz wiedergegeben werden. Aus diesem Grunde variieren die grauen Balken, welche die „Abdeckung“ der Merkmals-/Eigenschaftsklassen durch die CAx-Werkzeuge symbolisieren, auch nur in groben Stufen zwischen „gar nicht erfaßt“ (0 %) und „vollständig erfaßt“ (100 %).

CAx-System(klasse)	Erfaßte Merkmale (C _i)	Modellierungsbedingungen (MC _j)	Erfaßte Eigenschaften (P _j)													
CAD-Systeme (konventionell)	<table border="1"> <tr><td>Parts Structure</td></tr> <tr><td>Identification & Classific.</td></tr> <tr><td>Position & Orientation</td></tr> <tr><td>Geometry & Topology</td></tr> <tr><td>Material Char. & Distrib.</td></tr> <tr><td>Internal Relations (IR_{xi})</td></tr> </table>	Parts Structure	Identification & Classific.	Position & Orientation	Geometry & Topology	Material Char. & Distrib.	Internal Relations (IR _{xi})	(2D) 3D - (Wireframe) - Surface - Volume / B-Rep - Volume / CSG - Volume / Voxel	<table border="1"> <tr><td>Functions, funct. prop.</td></tr> <tr><td>Strength/stabil./rig. prop.</td></tr> <tr><td>Safety/reliability propert.</td></tr> <tr><td>Ergonomic properties</td></tr> <tr><td>Aesthetic properties</td></tr> <tr><td>Spatial prop./dim./weight</td></tr> <tr><td>Manufact./ass./test prop.</td></tr> </table>	Functions, funct. prop.	Strength/stabil./rig. prop.	Safety/reliability propert.	Ergonomic properties	Aesthetic properties	Spatial prop./dim./weight	Manufact./ass./test prop.
Parts Structure																
Identification & Classific.																
Position & Orientation																
Geometry & Topology																
Material Char. & Distrib.																
Internal Relations (IR _{xi})																
Functions, funct. prop.																
Strength/stabil./rig. prop.																
Safety/reliability propert.																
Ergonomic properties																
Aesthetic properties																
Spatial prop./dim./weight																
Manufact./ass./test prop.																
CAD-Systeme (parametrisch)	<table border="1"> <tr><td>Parts Structure</td></tr> <tr><td>Identification & Classific.</td></tr> <tr><td>Position & Orientation</td></tr> <tr><td>Geometry & Topology</td></tr> <tr><td>Material Char. & Distrib.</td></tr> <tr><td>Internal Relations (IR_{xi})</td></tr> </table>	Parts Structure	Identification & Classific.	Position & Orientation	Geometry & Topology	Material Char. & Distrib.	Internal Relations (IR _{xi})	3D - Volume / B-Rep - Volume / CSG - Volume / Voxel Par. - History-based - Constraint net	<table border="1"> <tr><td>Functions, funct. prop.</td></tr> <tr><td>Strength/stabil./rig. prop.</td></tr> <tr><td>Safety/reliability propert.</td></tr> <tr><td>Ergonomic properties</td></tr> <tr><td>Aesthetic properties</td></tr> <tr><td>Spatial prop./dim./weight</td></tr> <tr><td>Manufact./ass./test prop.</td></tr> </table>	Functions, funct. prop.	Strength/stabil./rig. prop.	Safety/reliability propert.	Ergonomic properties	Aesthetic properties	Spatial prop./dim./weight	Manufact./ass./test prop.
Parts Structure																
Identification & Classific.																
Position & Orientation																
Geometry & Topology																
Material Char. & Distrib.																
Internal Relations (IR _{xi})																
Functions, funct. prop.																
Strength/stabil./rig. prop.																
Safety/reliability propert.																
Ergonomic properties																
Aesthetic properties																
Spatial prop./dim./weight																
Manufact./ass./test prop.																
CAD-Systeme (konv./param.) ⊕ VR/DMU	<table border="1"> <tr><td>Parts Structure</td></tr> <tr><td>Identification & Classific.</td></tr> <tr><td>Position & Orientation</td></tr> <tr><td>Geometry & Topology</td></tr> <tr><td>Material Char. & Distrib.</td></tr> <tr><td>Internal Relations (IR_{xi})</td></tr> </table> <p>If also parametric</p>	Parts Structure	Identification & Classific.	Position & Orientation	Geometry & Topology	Material Char. & Distrib.	Internal Relations (IR _{xi})	3D - Volume / B-Rep - Volume / CSG - Volume / Voxel DMU - Assembly - Clearances	<table border="1"> <tr><td>Functions, funct. prop.</td></tr> <tr><td>Strength/stabil./rig. prop.</td></tr> <tr><td>Safety/reliability propert.</td></tr> <tr><td>Ergonomic properties</td></tr> <tr><td>Aesthetic properties</td></tr> <tr><td>Spatial prop./dim./weight</td></tr> <tr><td>Manufact./ass./test prop.</td></tr> </table>	Functions, funct. prop.	Strength/stabil./rig. prop.	Safety/reliability propert.	Ergonomic properties	Aesthetic properties	Spatial prop./dim./weight	Manufact./ass./test prop.
Parts Structure																
Identification & Classific.																
Position & Orientation																
Geometry & Topology																
Material Char. & Distrib.																
Internal Relations (IR _{xi})																
Functions, funct. prop.																
Strength/stabil./rig. prop.																
Safety/reliability propert.																
Ergonomic properties																
Aesthetic properties																
Spatial prop./dim./weight																
Manufact./ass./test prop.																
FEM-Systeme (andere Software zur Berechnung ähnlich)	<table border="1"> <tr><td>Parts Structure</td></tr> <tr><td>Identification & Classific.</td></tr> <tr><td>Position & Orientation</td></tr> <tr><td>Geometry & Topology</td></tr> <tr><td>Material Char. & Distrib.</td></tr> <tr><td>Internal Relations (IR_{xi})</td></tr> </table> <p>If modelling "contacts"</p>	Parts Structure	Identification & Classific.	Position & Orientation	Geometry & Topology	Material Char. & Distrib.	Internal Relations (IR _{xi})	- 2D/3D - Element types - Mesh - Failure criteria	<table border="1"> <tr><td>Functions, funct. prop.</td></tr> <tr><td>Strength/stabil./rig. prop.</td></tr> <tr><td>Safety/reliability propert.</td></tr> <tr><td>Ergonomic properties</td></tr> <tr><td>Aesthetic properties</td></tr> <tr><td>Spatial prop./dim./weight</td></tr> <tr><td>Manufact./ass./test prop.</td></tr> </table>	Functions, funct. prop.	Strength/stabil./rig. prop.	Safety/reliability propert.	Ergonomic properties	Aesthetic properties	Spatial prop./dim./weight	Manufact./ass./test prop.
Parts Structure																
Identification & Classific.																
Position & Orientation																
Geometry & Topology																
Material Char. & Distrib.																
Internal Relations (IR _{xi})																
Functions, funct. prop.																
Strength/stabil./rig. prop.																
Safety/reliability propert.																
Ergonomic properties																
Aesthetic properties																
Spatial prop./dim./weight																
Manufact./ass./test prop.																

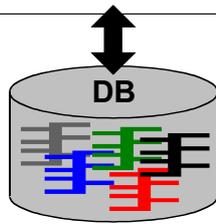
CAx-System(klasse)	Erfaßte Merkmale (C _i)	Modellierungsbedingungen (MC _j)	Erfaßte Eigenschaften (P _j)													
EDM/PDM-Systeme	<table border="1"> <tr><td>Parts Structure</td></tr> <tr><td>Identification & Classific.</td></tr> <tr><td>Position & Orientation</td></tr> <tr><td>Geometry & Topology</td></tr> <tr><td>Material Char. & Distrib.</td></tr> <tr><td>Internal Relations (IR_{xi})</td></tr> </table> <p style="color: red; text-align: center;">PDM does not derive properties from characteristics (like most other CAx-systems do), ...</p>	Parts Structure	Identification & Classific.	Position & Orientation	Geometry & Topology	Material Char. & Distrib.	Internal Relations (IR _{xi})	<ul style="list-style-type: none"> - Identification - Classification - Structure - Where to find (pointers) - Organisational data (people, dates, version, state, ...) <div style="text-align: center;">  <p>DB</p> </div>	<table border="1"> <tr><td>Functions, funct. prop.</td></tr> <tr><td>Strength/stabil./rig. prop.</td></tr> <tr><td>Safety/reliability propert.</td></tr> <tr><td>Ergonomic properties</td></tr> <tr><td>Aesthetic properties</td></tr> <tr><td>Spatial prop./dim./weight</td></tr> <tr><td>Manufact./ass./test prop.</td></tr> </table> <p style="text-align: center;">⋮</p> <p style="color: green; text-align: center;">... but it provides information about past solutions (elements, patterns). Whether it tells about their characteristics or their properties or both depends on the (type of) product model implemented!</p>	Functions, funct. prop.	Strength/stabil./rig. prop.	Safety/reliability propert.	Ergonomic properties	Aesthetic properties	Spatial prop./dim./weight	Manufact./ass./test prop.
Parts Structure																
Identification & Classific.																
Position & Orientation																
Geometry & Topology																
Material Char. & Distrib.																
Internal Relations (IR _{xi})																
Functions, funct. prop.																
Strength/stabil./rig. prop.																
Safety/reliability propert.																
Ergonomic properties																
Aesthetic properties																
Spatial prop./dim./weight																
Manufact./ass./test prop.																

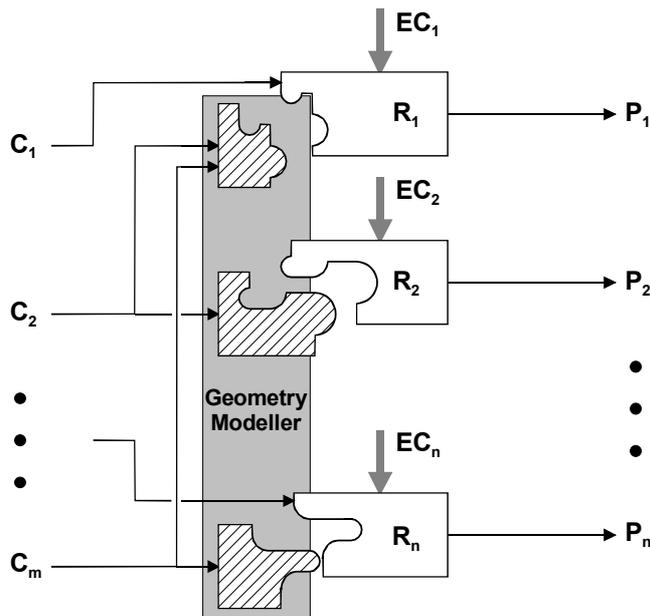
Tabelle 3: (Grobe) Klassifizierung der wichtigsten CAx-Werkzeuge (alle analytisch)

Für ein konkretes CAx-System könnte man genauere Ergebnisse ermitteln, die von der hier gezeigten Einordnung verallgemeinerter Systemklassen wohl auch oft abweichen würden. Dabei wäre auch die Abhängigkeit vom konkreten Anwendungsfall zu berücksichtigen, da dieser die weitere Untergliederung der Eigenschaften sowie deren Prioritäten/Gewichtungen bestimmt (siehe die in Abschnitt 2 angesprochene diesbezügliche Hypothese der Autoren).

Insofern wird in diesem Beitrag eher eine neue, nämlich auf dem dargestellten neuen Ansatz zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen beruhende Art der Klassifizierung von CAx-Werkzeugen vorgestellt als das Resultat einer erschöpfenden (Markt-) Analyse.

Dennoch sind einige grundlegende Aussagen interessant:

- Das bis heute im Bereich der Produktentwicklung/-konstruktion dominierende Werkzeug CAD macht eigentlich nur sehr wenige Aussagen über Produkteigenschaften: Lediglich räumliche Verhältnisse, Gesamtabmessungen sowie – falls es sich um ein 3D-Volumenmodell handelt und falls eine Information über die Dichte des jeweils verwendeten Werkstoffes enthalten ist – Gewichte gehen direkt aus dem CAD-System hervor. Die CAx-Systemklasse „CAD“ soll damit nicht abqualifiziert werden, ist die Geometrie, deren Modellierung die Hauptaufgabe von CAD-Systemen ist, doch wichtige Voraussetzung für die Modellierung zahlreicher weiterer Eigenschaften eines Produktes (**Bild 9**). Eine selbständige Eigenschaft ist „Geometrie“ aber nicht. Dementsprechend haben CAx-Systeme mit der Fähigkeit, Geometrie zu modellieren, keinen Selbstwert, sondern – etwas drastisch ausgedrückt – nur „Zuträgerfunktionen“ für andere Systeme.
- Parametrische CAD-Systeme können auf einem eingeschränkten Gebiet (Geometrie, Kinematik) Aussagen über die Funktionsweise, in einigen Fällen auch über ergonomische Eigenschaften einer Lösung machen.

**Bild 9:**

Geometrische Merkmale als wichtiger Bestandteil zahlreicher Produkteigenschaften

- Wird CAD um VR/DMU ergänzt, so können erheblich weitergehende Studien zu den funktionalen, ergonomischen und erstmals auch zu den Herstellungseigenschaften des Produktes (z.B. Montage-/Demontagesimulationen) getrieben werden.
-
-
- FEM-Systeme können Aussagen über funktionale Eigenschaften liefern, soweit diese mit den berechneten physikalischen Effekten zusammenhängen (z.B. Federberechnung [ScKM-99], Gleitlagerberechnung). Ihre eigentliche Domäne sind Aussagen über Fe-

stigkeits-/Steifigkeits-/Stabilitätseigenschaften und – darauf aufbauend – Aspekte der Sicherheit des Produktes (z.B. Crash-Simulation).

FEM-Systeme waren in der Vergangenheit nur auf einzelne Bauteile bezogen und werden in weiten Teilen der Praxis noch heute ausschließlich so angewandt. Die Verwaltung der Zusammenhänge zwischen den Bauteilen (hier in bezug auf Randbedingungen, Netzanpassungen, physikalische Effekte an den gemeinsamen Oberflächen) obliegt in diesem Falle dem Benutzer. Nur wenn das FEM-System sogenannte Kontaktprobleme behandeln kann (und diese Funktionalität auch ausgenutzt wird), sind bauteilübergreifende Aussagen (teil-) automatisch ermittelbar.

Für andere Berechnungssysteme (z.B. MKS, CFD) gilt Analoges wie für den Bereich FEM, allerdings stehen andere funktionale Eigenschaften im Vordergrund.

- EDM/PDM-Systeme liefern direkt eigentlich überhaupt keine Aussagen über Produkteigenschaften. Sie verwalten lediglich Lösungen aus der Vergangenheit, deren Merkmale und Eigenschaften bereits festliegen. Für den Produktentwickler/Konstrukteur wird dies dann sinnvoll, wenn er einen Zugriff hierauf über die **Eigenschaften** erhält (und nicht [nur] über die Merkmale!): Er würde dann im Rahmen einer neuen Entwicklungs-/Konstruktionsaufgabe mit den nun geforderten Eigenschaften nach Lösungen aus der Vergangenheit suchen, die ähnliche Eigenschaften. Diese leiten ihn dann – ganz ähnlich wie in Abschnitt 5 für das *feature-based modelling* erwähnt (siehe auch Bild 8: Features als „Lösungsmuster“) – auf die Merkmale einer oder mehrerer potentieller Lösungen für die neue Aufgabe. Noch mehr Nutzen ergibt sich, wenn das EDM/PDM-System noch Angaben über die (Ermittlung der) Zusammenhänge zwischen den Merkmalen und den Eigenschaften der gefundenen Lösungen/ Lösungsmuster enthält, etwa Protokolle über die in der Vergangenheit verwendeten Analysewerkzeuge.

Alle in Tabelle 3 enthaltenen CAx-Systeme bzw. -Systemklassen – streng genommen: mit Ausnahme der EDM/PDM-Systeme – dienen primär der **Analyse**: Wenn sämtliche relevanten Merkmale im voraus bekannt sind, kann das Programm Aussagen über die jeweils genannten Eigenschaften ableiten.

Für den umgekehrten Fall der **Synthese** – Ableitung von Merkmalen aufgrund vorgegebener Eigenschaften, Frage 4 vom Anfang des vorliegenden Abschnittes – muß nun gerade im Zu-

sammenhang mit rechnerunterstützten Methoden zwischen mehreren Möglichkeiten unterschieden werden (wie im vorangegangenen Abschnitt 5 bereits angedeutet):

- Ausgehend von variierenden Quantitätsangaben der (bekannten/vordefinierten und qualitativ unveränderlichen) Eigenschaften einer neuen Aufgabe werden (qualitativ ebenfalls unveränderliche) Merkmale quantifiziert. Basis sind feste, „algorithmische“ Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften und den Merkmalen, die im vorab programmiert werden können (durchaus auch iterativ, wenn „inverse“ Beziehungen $[R_j^{-1}]$ nicht direkt ableitbar sind).

Solcherart eingeschränkte Syntheseaufgaben ließen sich in der Vergangenheit bereits CAD-Variantenprogrammen bearbeiten; das zeitgemäßere Basiswerkzeug heute wäre ein parametrisches CAD-System, allerdings fehlen Vertretern dieser Systemklasse oft noch sinnvolle Ankopplungsmöglichkeiten für die Algorithmen, welche den Zusammenhang zwischen Eigenschaften und Merkmalen herstellen (Geometrie alleine reicht hier nicht, siehe oben!). Bei diesem Verfahren werden immer die gleichen Eigenschaften und Merkmale angesprochen, Aufgaben mit einem geänderten „Eigenschaftsvektor“ und/oder anderen Merkmalen können nicht bearbeitet werden.
- Ausgehend von qualitativ und quantitativ wechselnden Eigenschaften und ihrer Kombination (die in ihrer Gesamtheit aber dennoch im voraus bekannt/vordefiniert sind) werden bestimmte Merkmale der Lösung qualitativ und quantitativ festgelegt (vielleicht besser: zugeordnet). Basis sind im voraus abgespeicherte „Lösungsmuster“, die bestimmte Merkmale und Eigenschaften tragen. Sie können in ihrem Umfang bzw. ihrer Komplexität von elementaren Features bis zu vierteiligen Lösungskomponenten reichen, die als Gesamtbaugruppen in das neue Produkt eingehen.

Basis der informationstechnischen Realisierung ist hierbei eine Art „Mustervergleich“ (*pattern matching*), oft datenbankgestützt und zunehmend mittels objektorientierter Methoden programmiert. Ein Ausgangspunkt der Realisierung kann durchaus das EDM/PDM-System sein (siehe hierzu die diesbezüglichen Überlegungen weiter oben). Ein völlig anderer Ansatz beruht auf neuronalen Netzen [Kraus-98/99], also einer Art Nachbildung der natürlichen bzw. menschlichen Mustererkennung durch den Computer.

Bisher gibt es kaum kommerzielle Lösungen, aber eine große Zahl an Forschungs- und Entwicklungssystemen auf verschiedenen Komplexitätsstufen. Ein besonderer Problem- punkt dieses Verfahrens ist die Behandlung von Widersprüchen (Zielkonflikten), wenn kombinierte Eigenschaften zu einander ausschließenden Merkmalen und/oder Merkmalsausprägungen führen. Auch mit diesem Verfahren lassen sich keine völlig neuen Entwicklungs-/Konstruktionsaufgaben bearbeiten; jedoch können im Idealfall durchaus neue Kombinationen bekannter Lösungsmuster (Eigenschaften und Merkmale) abgedeckt werden.
- Die Erzeugung vorher überhaupt nicht bekannter Merkmale, womöglich noch aufgrund völlig neuer Eigenschaften, wäre die höchste Stufe der Synthese („reine Synthese“). Hier ist grundsätzlich zu fragen, ob dies in absehbarer Zeit jemals mit Programm(system)en realisierbar sein wird. Ein Schlüssel zur weiteren Erforschung dieser Frage könnte in den bereits erwähnten denkpsychologischen Durchdringung des Entwicklungs-/Konstruktionsprozesses liegen: Wenn nämlich auch die menschliche Kreativität im wesentlichen auf den „Mechanismus“ der Assoziation zurückzuführen ist, so bestehen im Prinzip doch keine so großen Unterschiede zu der im voranstehenden Punkt diskutierten Suche/Zuordnung von Lösungsmustern, die – zumindest ansatzweise und für einfache Fälle – von einzelnen experimentellen CAx-Werkzeugen bereits heute durchgeführt werden kann!

7 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird ein neuartiger Ansatz zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen vorgestellt. Dieser wird diskutiert und anschließend zur Charakterisierung und Klassifizierung von informationstechnischen Werkzeugen für den Entwicklungs-/Konstruktionsprozeß (CAx-Werkzeugen, -Systemen) herangezogen. Es ergeben sich zahlreiche Anregungen für weitere Untersuchungen, sowohl in bezug auf die Konstruktionsmethodik/Konstruktionswissenschaft als auch in bezug auf die nähere Analyse der Einsatzmöglichkeiten von CAx-Werkzeugen sowie deren mögliche Weiter- und Neuentwicklung.

Neben der weiteren Verfolgung der theoretischen Aspekte der vorgestellten Arbeiten planen die Autoren auf dem letztgenannten Gebiet – CAx-Werkzeuge – Aktivitäten mit folgendem Fokus:

- genauere Analyse und Klassifizierung von CAx-Werkzeugen (im vorliegenden Beitrag wird zunächst nur das Instrumentarium vorgestellt)
- Auffinden von Lücken (von CAx-Werkzeugen bisher unzureichend/gar nicht abgedeckte Eigenschaftsklassen) zur Anregung entsprechender Neu- und Weiterentwicklungen
- nähere Untersuchung der Frage, wie CAx-Werkzeuge für die Durchführung „echter“ Syntheseprozesse aussehen müssen

8 Literaturverzeichnis

- [Andr-95] Andreasen, M.M.: System Modelling. PhD-Course on Design Theory and Research. Technical University of Denmark, Lyngby 1995. (Ebenso in den PhD-Kursen der Folgejahre sowie in zahlreichen Präsentationen und persönlichen Diskussionen.)
- [DIN-4000] DIN 4000-1: Sachmerkmaleleisten; Begriffe und Grundsätze. Beuth-Verlag, Berlin 1992.
- [Fran-99] Franke, H.-J.: Ungelöste Probleme der Konstruktionsmethodik. In: [FrKM-99], S. 13-30.
- [FrKM-99] Franke, H.-J.; Krusche, T.; Mette, M. (Hrsg.): Konstruktionsmethodik – Quo vadis? Symposium anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. Karlheinz Roth. Institut für Konstruktionslehre der TU Braunschweig, Bericht Nr. 56, 1999.
- [FrLu-99] Franke, H.-J.; Lux, S.: Gadgets – wissensbasierte aktive Entwurfselemente. In: [VDI-99], S. 221-232.
- [FrPS-94] Franke, H.-J.; Peters, M.; Schulz, A.: Modellieren mit Gadgets – eine interaktive Methode zur intelligenten Verbindung von Berechnung und Konstruktion. In: [VDI-94], S. 533-549.
- [Hubk-73] Hubka, V.: Theorie der Maschinensysteme. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 1973 (1. Auflage).
- [Hubk-84] Hubka, V.: Theorie technischer Systeme. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 1984 (2. Auflage von [Hubk73]).
- [HuEd-92] Hubka, V.; Eder, W.E.: Einführung in die Konstruktionswissenschaft. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 1992.
- [HuEd-96] Hubka, V.; Eder, W.E.: Design Science. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 1996.
- [ICED-99] Lindemann, U.; Birkhofer, H.; Meerkamm, H.; Vajna, S. (Hrsg.): Schriftenreihe „Workshop-Design-Konstruktion“, WDK 26, Proceedings of the 12th International Conference on Engineering Design 1999 (ICED 99), München 24.-26.08.1999. Technische Universität München, 1999.
- [ISO-13584] ISO DIS 13584-1: Industrial Automation Systems and Integration; Parts Library – Overview and Fundamental Principles. Beuth-Verlag, Berlin 1998.
- [KIZe-98] Klose, J.; Zetzsche, T.: Konstruieren mit funktional-technischen Objekten zur Kopplung von Berechnung und Gestaltung. In: [Meer-98], S. 169-174.

- [Meer-97] Meerkamm, H. (Hrsg.): Report des 7. Symposiums „Fertigungsgerechtes Konstruieren“, Schnaittach/Erlangen 1996. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik 1997.
- [Meer-98] Meerkamm, H. (Hrsg.): Report des 9. Symposiums "Fertigungsgerechtes Konstruieren", Schnaittach/Erlangen 1998. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, 1998.
- [Schw-97] Schweiger, W.: Der Verfahrensraum – eine Systematik für Berechnungsverfahren. In: [Meer-97], S. 86-91.
- [ScKM-99] Schorcht, H.-J.; Kletzin, U.; Mücke, D.: Spring Processor – an Example of an Object-Oriented FEM Application. In: [ICED-99], Vol. 1, S. 445-448.
- [ScSt-94] Schulte, M.; Stark, R.: Definition und Anwendung höherwertiger Konstruktionselemente (Design Features) am Beispiel von Wellenkonstruktionen. Forschungsbericht Universität des Saarlandes, Saarbrücken 1994. Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 2.
- [Suh-90] Suh, N.P.: The Principles of Design. Oxford University Press 1990.
- [Vajn-98] Vajna, S. (Hrsg.): Tagungsband 2nd International Workshop „Integrated Product Development“ (IPD 98), Magdeburg 17.-18.09. 1998. Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg 1998.
- [VaWe-00] Vajna, S.; Weber, C.: Teilmodelle im Konstruktionsprozeß – Bindeglied zwischen methodischer und rechnerunterstützter Konstruktion. Konstruktion 52 (2000) 4, S. 46-50.
- [VDI-2218] VDI-Richtlinie 2218: Feature-Technologie (Entwurf). VDI-Verlag, Düsseldorf 1999.
- [VDI-2221] VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI-Verlag, Düsseldorf 1993.
- [VDI-94] VDI-Berichte Nr. 1148: Tagungsband VDI-Fachtagung „Datenverarbeitung in der Konstruktion '94“, München 27.-28.10.1994. VDI-Verlag, Düsseldorf 1994.
- [VDI-99] VDI-Berichte Nr. 1487: Tagungsband VDI-Fachtagung „Verkürzte Entwicklungsprozesse durch Integration von Gestaltung und Berechnung – Potentiale und Erfahrungen“, Stuttgart 08.-09.06.1999. VDI-Verlag, Düsseldorf 1999.
- [Webe-96] Weber, C.: What is a Feature and What is its Use – Results of FEMEX Working Group I. Proceedings of the 29th International Symposium on Automotive Technology and Automation (ISATA 96), S. 287-296, Florenz 1996.
- [WeWe-98a] H. Werner, C. Weber: LIGO – an Object-Oriented Modelling Tool for IPD. In: [Vajn-98], S. 44-51.
- [WeWe-98b] H. Werner, C. Weber: Eine Implementierung des Chromosomenmodells mit Hilfe des objektorientierten Konstruktionssystems Ligo. In: [Meer-98], S. 143-148.
- [Kraus-98/99] Krause, F.-L.: Verschiedene Berichte zum DFG-Projekt KR 785/13 „Neuronale-Netze-basiertes Assistenzsystem zur integrierten Unterstützung des Entwicklungsprozesses“. Technische Universität Berlin, Fachgebiet Industrielle Informationstechnik, 1998/1999.

Prof. Dr.-Ing. Christian Weber
 Dipl.-Ing. Horst Werner
 Universität des Saarlandes
 Konstruktionstechnik/CAD
 Postfach 15 11 50
 D – 66041 Saarbrücken
 Tel: +49 / (0)681 / 302 – 3075, – 3387
 Fax: +49 / (0)681 / 302 – 4858
 E-Mail: weber@cad.uni-sb.de, werner@cad.uni-sb.de