

**SCHLUßFOLGERUNGEN FÜR „DESIGN FOR X“ (DFX)
AUS DER PERSPEKTIVE EINES NEUEN ANSATZES ZUR MODELLIERUNG
VON PRODUKTEN UND PRODUKTENTWICKLUNGSPROZESSEN**

Christian Weber, Horst Werner

Zusammenfassung

Bis heute gibt es in der „klassischen“ Konstruktionsmethodik einen Bruch zwischen den relativ stark formalisierten frühen Phasen der Produktentwicklung und den Aktivitäten beim Entwerfen und Ausarbeiten („späte Phasen“), die eher intuitiv ausgeführt werden und durch kaum formalisierte Methoden und Regelwerke unterstützt werden. Gerade in diesen Phasen liegt traditionell der Schwerpunkt des „Design for X“ (DfX). In diesem Beitrag wird ausgehend von dem in [WeWe-00] vorgestellten Ansatz zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen eine stärker formalisierte Darstellung von DfX gegeben und darauf aufbauend das Wesen von DfX-Werkzeugen und typische Probleme bei deren Anwendung diskutiert. Es werden Möglichkeiten zur Klassifizierung und Neuausrichtung von DfX-Werkzeugen (Kataloge, Regelwerke und Software) aufgezeigt.

1 Einleitung

Auf dem Symposium „Design for X“ (DfX) des vergangenen Jahres wurde von den Autoren ein neuartiger Ansatz zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen vorgestellt und zur Klassifizierung von CAx-Werkzeugen herangezogen [WeWe-00]. Genau der gleiche Ansatz – in weiterentwickelter Form – bildet die Grundlage des vorliegenden Beitrages. Die Betrachtung ist einerseits etwas spezieller als im vergangenen Jahr – Herausgreifen des Themas „DfX“ –, in anderer Hinsicht aber auch allgemeiner, indem nicht nur rechnerunterstützte, sondern alle Vorgehensweisen und Werkzeuge einbezogen werden.

2 Basismodelle

Hintergründe und wesentliche Inhalte des angesprochenen neuartigen Ansatzes zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen wurden bereits in [WeWe-00] dargestellt. Während auf die Hintergründe hier nicht noch einmal eingegangen werden soll, seien die wesentlichen Inhalte im folgenden noch einmal kurz zusammengefaßt, um den vorliegenden Beitrag für sich geschlossen verständlich zu machen.

Die neuen Überlegungen zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen basieren auf der Lehre von den Merkmalen (englisch: *characteristics*) und Eigenschaften (*properties*) von Produkten. *Merkmale* können hierbei vom Konstrukteur direkt festgelegt werden und *definieren das Produkt*, während die *Eigenschaften* das *Verhalten des Produktes* beschreiben und sich aus den Merkmalen ergeben, aber nicht direkt durch den Konstrukteur festgelegt werden können. Die Merkmale entsprechen weitgehend dem, was in [Hubk-73, Hubk-84, HuEd-92, HuEd-96] "internal properties" und in [Suh-90] „design parameters“ genannt wird, also beispielsweise Geometrie, Werkstoff oder Oberfläche eines Produktes. Die Eigenschaften sind mit den bei Hubka/Eder "external properties" und bei Suh „functional requirements“ genannten Attributen eines Produktes verwandt, z.B. Gewicht, Sicherheit,

Asthetik, aber auch etwa Fertigungs-, Montage-, Prüfgerechtigkeit, Umweltgerechtigkeit oder Kosten des Produktes.

Die Merkmale und die Eigenschaften müssen weiter untergliedert werden, um sie handhabbar zu machen. **Bild 1** zeigt hierzu links einen naheliegenden, nämlich an der Erzeugnisstruktur eines Produktes orientierten Vorschlag zur Gliederung der Merkmale bzw. Merkmalsklassen (*characteristics, classes of characteristics*). Rechts sind die wichtigsten Eigenschaften/Eigenschaftsklassen (*properties, classes of properties*) von Produkten wiedergegeben. Auch diese Liste muß weiter untergliedert werden (z.B. genauere Spezifikation der Eigenschaftsklasse „Sicherheit und Zuverlässigkeit“). Leider ist aber jede weitere Untergliederung der Eigenschaften/Eigenschaftsklassen in hohem Maße produktgruppen-, häufig sogar unternehmensspezifisch (d.h. im Beispiel: die Unter Aspekte von „Sicherheit“ sind für Kraftfahrzeuge andere als für Haushaltsgeräte oder Produktionsanlagen), so daß eine *allgemeine* weitere Gliederung nicht sinnvoll erscheint.

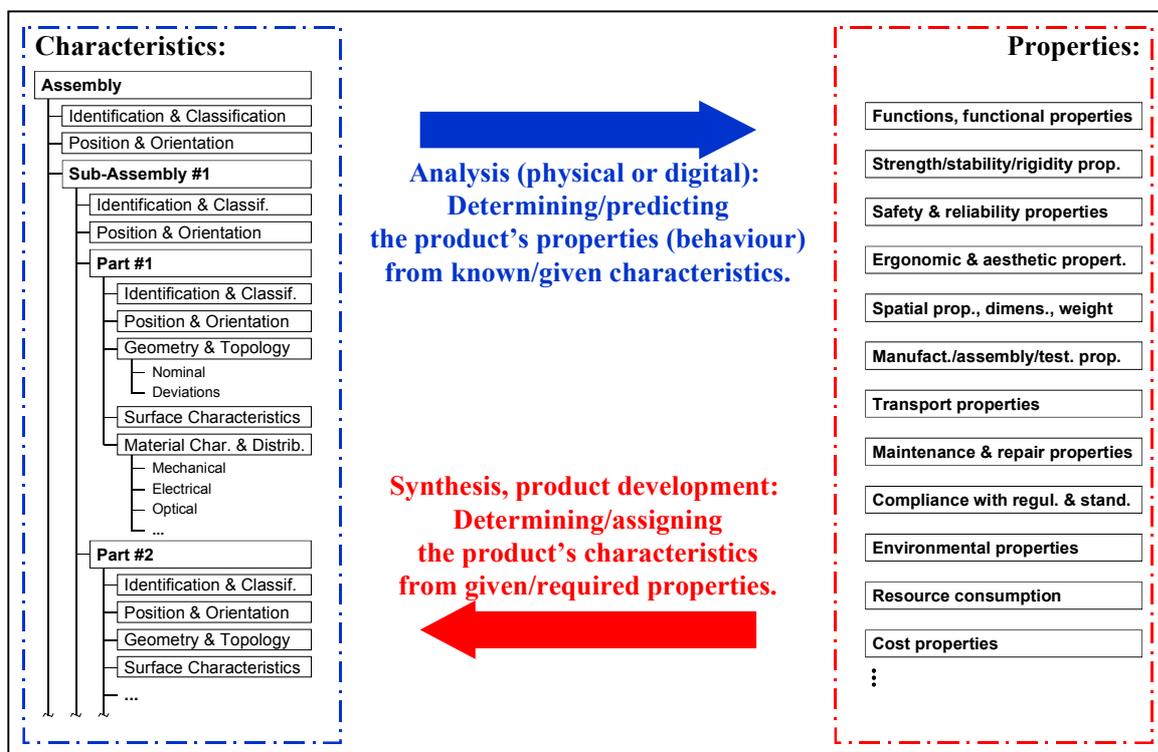


Bild 1: Merkmale und Eigenschaften von Produkten sowie grundlegende Bezüge dazwischen

Bild 1 deutet weiterhin die beiden möglichen Bezüge zwischen den Merkmalen und den Eigenschaften an, die mit den aus der Konstruktionsmethodik bekannten Grundoperationen „Analyse“ und „Synthese“ von Produkten in unmittelbarem Zusammenhang stehen:

- **Analyse:** Aufgrund bekannter/vorgegebener Merkmale eines Produktes werden dessen Eigenschaften (dessen Verhalten) bestimmt oder – sofern das Produkt physisch noch gar nicht existiert – vorhergesagt. Analysen können sowohl physisch (z.B. am Prototypen) als auch „virtuell“ (z.B. durch digitale Simulation) durchgeführt werden.
- **Synthese:** Aufgrund vorgegebener/geforderter Eigenschaften (Verhaltensweisen) eines Produktes werden dessen Merkmale festgelegt. Die Synthese ist letztlich der Kern der Produktentwicklung: Aufgabe des Produktentwicklers/Konstrukteurs ist es, ausgehend von den Anforderungen des Marktes/des Kunden, den letztlich nur die Eigenschaften ei-

nes Produktes interessieren, die Merkmale der Lösung so festlegen, daß die geforder-
ten/gewünschten Eigenschaften erzielt werden.

In dem neuen Ansatz zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen werden die vorstehend zunächst nur skizzierten Bezüge zwischen Merkmalen und Eigen-
schaften nun detaillierter betrachtet. Konkret wird von einer Netzwerkstruktur ausgegangen. Die **Bilder 2 und 3** zeigen die beiden auf darauf aufbauenden neuen Basismodelle für Pro-
dukte (Analyse bzw. Synthese). 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)

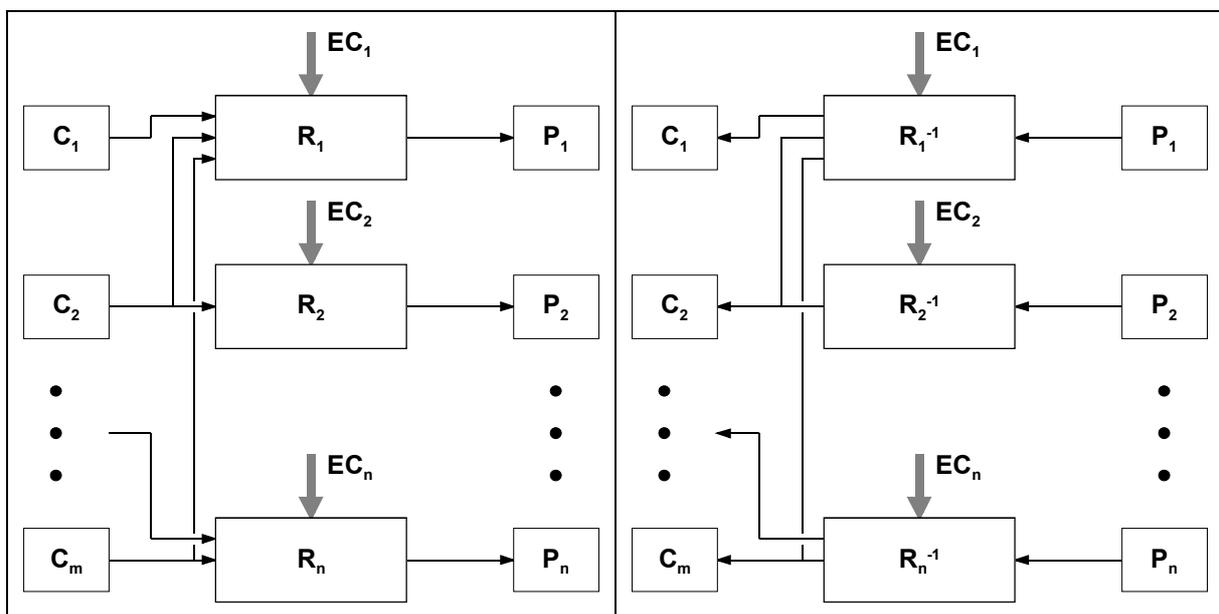


Bild 2: Basismodell – Analyse

Bild 3: Basismodell – Synthese

Bei der analytischen Sichtweise (**Bild 2**) repräsentieren die Kästen (R_j) den Einfluß, den jeweils eine Teilmenge der Merkmale (C_i) auf jede Eigenschaft (P_j) hat. Während sich beim fertigen Produkt die Eigenschaften gewissermaßen von selbst ergeben, benötigt man während des Produktentwicklungsprozesses Modelle, die eine Vorhersage der jeweils interessierenden Eigenschaften erlauben. Solche Modelle können physische Prototypen sein, häufig und mit zunehmender Tendenz werden aber (besonders in den frühen Phasen der Produktentwicklung) abstrahierte mathematische Ersatzmodelle verwendet. Bei diesen Ersatzmodellen kann der Zusammenhang zwischen Merkmalen und Eigenschaften mit Hilfe von analytischen oder numerischen Rechenverfahren (wie z.B. FEM im Falle der Eigenschaft „Festigkeit/Steifigkeit“), Tabellen oder Diagrammen bestimmt werden. Im Extremfall liegt noch nicht einmal ein mathematisch formalisiertes Modell vor, sondern die Eigenschaften werden anhand einiger weniger Merkmale mit Hilfe von einfachen Regeln, Erfahrungswissen oder Intuition abgeschätzt.

Die synthetische Sichtweise (**Bild 3**) ergibt sich formal aus der Umkehrung des Schemas nach Bild 2: Aus vorgegebenen (geforderten/gewünschten) Eigenschaften, die ein Produkt haben soll (P_j), sind dessen beschreibende Merkmale (C_i) zu bestimmen. Die gegenüber der Analyse invertierten Relationen (R_j^{-1}) stehen hierbei ganz allgemein für Arbeitsschritte, Methoden und Werkzeuge, die eine Festlegung von Merkmalen aufgrund von vorgegebenen Ei-

genschaften durchführen oder unterstützen können. Die Spannweite reicht wiederum von so weit wie möglich algorithmierten Vorgehensweisen über Regelwerke und methodische Anleitungen bis zu kaum formalisierbaren „Verfahren“ wie Assoziation und Intuition.

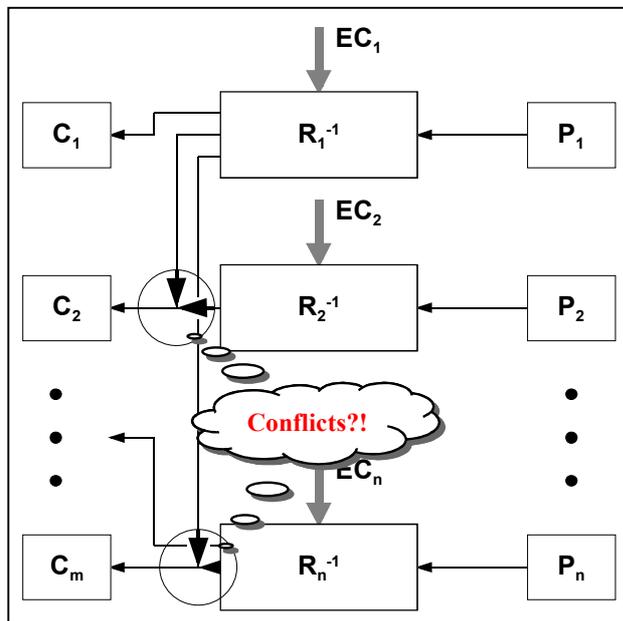


Bild 4: Zielkonflikte bei der Synthese (schematisch)

Die Synthese als einfache „Invertierung“ der Analyse anzusehen, ist eine stark vereinfachte Sicht, die eigentlich ergänzender Kommentare bedarf. Im Rahmen des vorliegenden Beitrages kann und soll diese Diskussion nicht im Detail geführt werden. Lediglich ein einziger Aspekt sei erwähnt, weil er auch eine gewisse Relevanz für die späteren Überlegungen bezüglich „Design for X“ (DfX) hat:

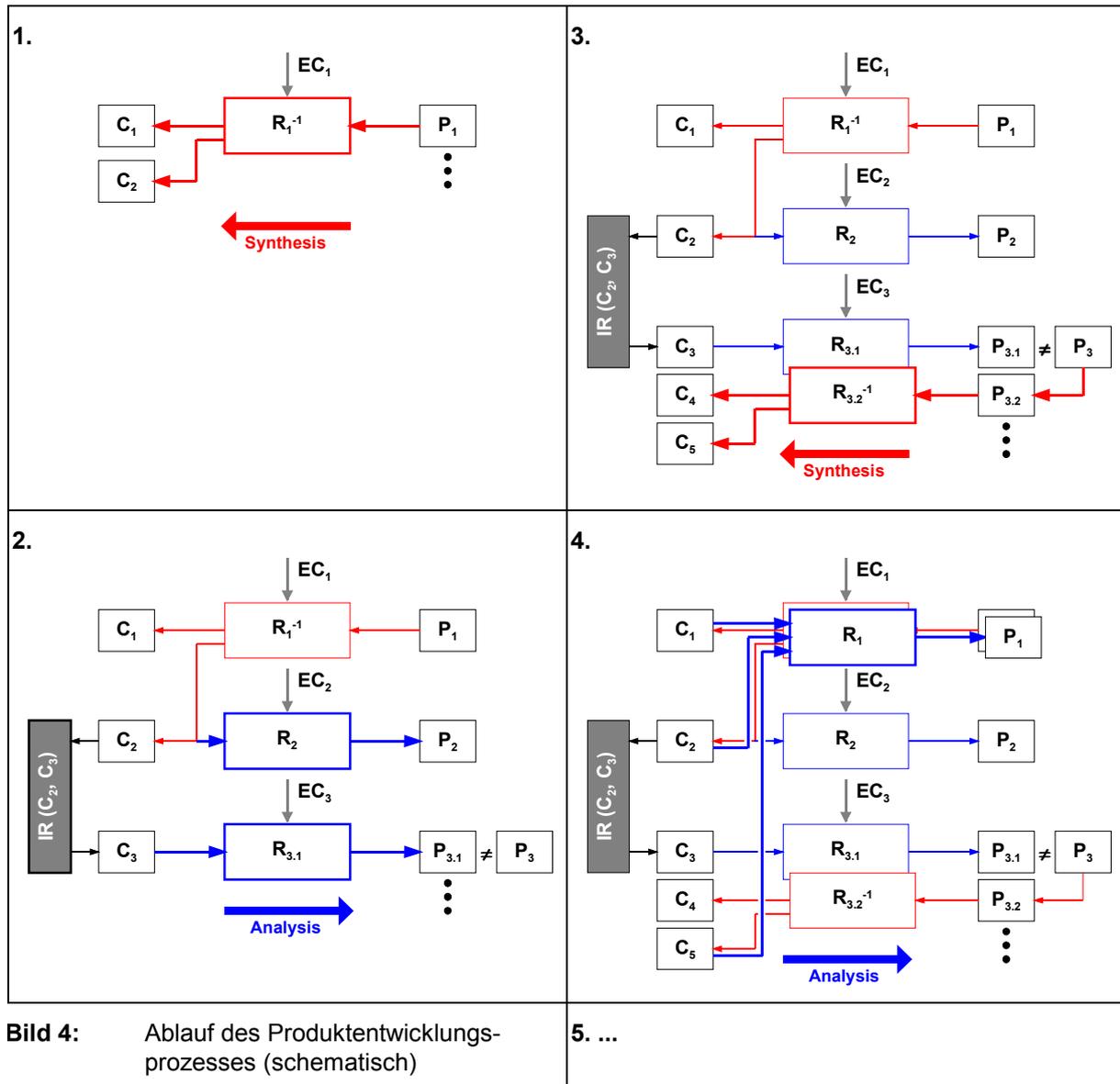
Schon das einfache Basismodell nach Bild 3 macht deutlich, daß bei der Synthese Zielkonflikte unvermeidlich sind, weil verschiedene Eigenschaften die gleichen Merkmale in unterschiedlicher Weise beeinflussen und

– wie aus der Praxis vielfach bekannt – im Ergebnis eigentlich qualitativ und/oder quantitativ unterschiedliche Ausprägungen dieser Merkmale erfordern würden (**Bild 4**).

Der Produktentwicklungsprozeß insgesamt läßt sich auf dieser Basis darstellen als ein in der groben Richtung („strategisch“) dem Modell nach Bild 3 folgender, im „taktischen Ablauf“ aber ständig zwischen der Synthese nach Bild 3 und der Analyse nach Bild 2 hin- und herwechselnder Vorgang modellhaft darstellen (**Bild 5**, schematisch). Im Prozeß werden sukzessive – bei jedem Syntheseschritt – immer mehr Merkmale (C_i) festgelegt, gleichzeitig wächst – jeweils durch die zwischengeschalteten Analyseschritte – die Kenntnis der sich daraus ergebenden Eigenschaften (P_j). Der Produktentwicklungsprozeß ist beendet, wenn alle zur Herstellung des Produktes benötigten Merkmale definiert sind und wenn alle relevanten Eigenschaften erstens bestimmt werden können und zweitens den ursprünglich geforderten Produkteigenschaften hinreichend gut entsprechen¹.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß aus der Perspektive der hier vorgestellten „Konstruktionstheorie“ der Begriff „frühe Phasen“ nicht durch die Arbeitsinhalte bestimmt wird (z.B. Bearbeitung funktionaler und prinzipieller Aspekte), sondern schlicht durch die Anzahl der schon bekannten Merkmale und die Anzahl der schon hinreichend sicher bestimmbareren Eigenschaften. Es erscheint dann völlig normal, daß in einer „späten Phase“ (d.h. bei vielen schon bekannten Merkmalen) die gleichen Eigenschaften, die in einer „frühen Phase“ schon betrachtet worden sind, noch einmal neu bestimmt werden müssen, dann allerdings sinnvollerweise mit einer anderen, nämlich die größere Anzahl der Merkmale einbeziehenden Methode (siehe z.B. Nr. 4 in dem Schema nach Bild 4). Oder umgekehrt formuliert: Bereits die bis hierhin vorgestellten, sehr einfachen Überlegungen zeigen, daß es in „frühen“ und in „späten“ Phasen für identische Eigenschaften jeweils unterschiedliche Methoden geben muß und daß diese sich (vor allem) durch die Anzahl der benötigten Merkmale unterscheiden.

¹ Was „hinreichend gut entsprechen“ bedeutet, sei hier nicht diskutiert. Es wäre eine eigene Abhandlung wert, die hiermit angesprochene Bewertungsproblematik vor dem Hintergrund des vorgestellten neuen Modells näher zu untersuchen.



3 Erweiterung des Basismodells im Hinblick auf „Design for X“

In den bisherigen Darstellungen wurde den äußeren Bedingungen (*external conditions*, EC_j), welche in die Relationen R_j bzw. R_j^{-1} eingehen und so sowohl bei der Analyse als auch bei der Synthese den Zusammenhang zwischen Merkmalen und Eigenschaften wesentlich beeinflussen, noch wenig Beachtung geschenkt. Sie spielen aber gerade in bezug auf „Design for X“ eine wichtige Rolle.

Im Kern liefern die äußeren Bedingungen (EC_j) Informationen über den Kontext, in dem die jeweils zugehörige Eigenschaft zu beurteilen ist. Z.B. ist es für die Beurteilung der funktionalen Eigenschaften wichtig zu wissen, welche Nutzungs-/Nutzerprofile vorliegen, „schönes Aussehen“ ist mit Blick auf bestimmte Modetrends und/oder kulturelle Eigenheiten der Kunden zu beurteilen. Weitere Beispiele, nun auf das Gebiet der „klassischen“ DfX-Methoden überleitend, sind:

- Festigkeitsgerechtes Konstruieren: Die Beurteilung der Festigkeit kann nur sinnvolle Ergebnisse liefern, wenn klar ist, ob Betriebs-, Zeit- oder Dauerfestigkeit gefordert ist (im letzten Fall: einschließlich Angabe der Beanspruchungskollektive!).

- Fertigungs-/montagegerechtes Konstruieren: Die Beurteilung der Fertigungs- oder Montagegerechtheit erfordert Kenntnisse über die Fertigungs- bzw. Montagebedingungen (Technologien, Systeme), welche in den hier vorgestellten Basismodellen zunächst einmal ebenfalls in Form von äußeren Bedingungen (EC_j) zu erfassen sind.

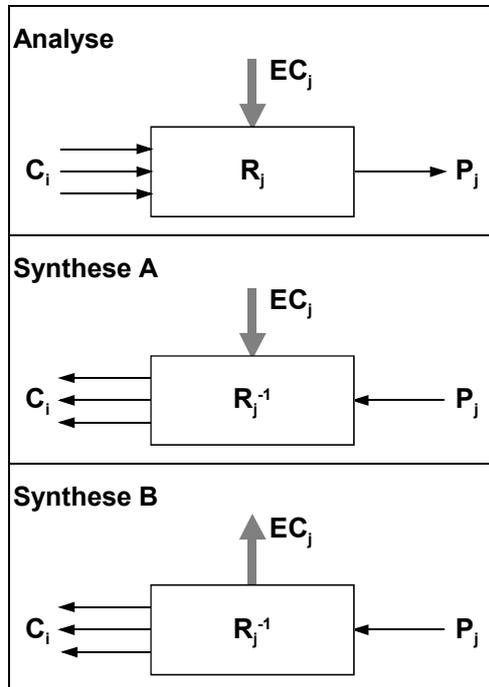


Bild 5: Verschiedene Möglichkeiten der Einbindung der äußeren Bedingungen (external conditions, EC_j)

Die äußeren Bedingungen können nun im Prozeß ganz unterschiedliche Rollen spielen (**Bild 5**):

- **Analyse:** Die (relevanten) Merkmale (C_i) des Produktes und die (relevanten) äußeren Bedingungen (EC_j) sind gegeben, ermittelt werden die Eigenschaften (P_j). Für das Beispiel „fertigungsgerechtes Konstruieren“ kann man sich etwa vorstellen, daß Geometrie und Werkstoff eines Bauteiles (Merkmale) sowie die Fertigungstechnologie und das Fertigungssystem (äußere Bedingungen) bekannt sind und die Eigenschaft „Fertigungsgerechtheit“ zu analysieren ist.
- **Synthese A (Synthese „nur“ des Produktes):** Es geht darum, ausgehend von vorgegebenen/gewünschten Produkteigenschaften (P_j) und unter Berücksichtigung bekannter äußerer Bedingungen (EC_j) die relevanten Merkmale des Produktes (C_i) festzulegen. Im Beispiel „fertigungsgerechtes Konstruieren“: (Fein-) Gestaltung des Produktes im Sinne einer möglichst guten Fertigbarkeit bei gegebener Fertigungstechnologie und bekanntem Fertigungssystem.
- **Synthese B (Synthese von Produkt und äußeren Bedingungen):** Hierbei werden ausgehend von vorgegebenen/gewünschten Produkteigenschaften (P_j) sowohl die relevanten Produktmerkmale (C_i) als auch – ganz oder teilweise – die erforderlichen äußeren Bedingungen (EC_j) festgelegt. Im Beispiel „fertigungsgerechtes Konstruieren“ hieße das, „gleichzeitig/simultan“ Produkt und Fertigungstechnologien/-systeme zu gestalten.

Natürlich sind viele Mischformen der vorstehend aufgelisteten Fälle denkbar. Es wäre jedoch sehr aufwendig (und würde wohl auch nicht viel bringen), diese alle hier im Detail zu untersuchen.

Die vorstehenden Erläuterungen zeigen die Rolle (bzw. die möglichen verschiedenen Rollen) der äußeren Bedingungen (EC_j) im Produktentwicklungsprozeß (analytische und synthetische Schritte) auf und stellen erste Bezüge zum „Design for X“ her. Völlig ungeklärt ist aber noch, aus was die äußeren Bedingungen resultieren bzw. was durch sie beeinflusst wird.

Um diese Frage zu beantworten, wird die in **Bild 6** dargestellte Erweiterung des Basismodells eingeführt: Danach werden die äußeren Bedingungen (EC_j) als Summe der relevanten Eigenschaften (Eigenschaftsvektor \underline{P}_X) des die betrachtete Produkteigenschaft (P_j) beeinflussenden Partnersystems „X“ betrachtet. Dieser Eigenschaftsvektor des „X-Systems“ hängt über Relationen (R_X) mit den (relevanten) Merkmalen des „X-Systems“ (C_{Xk}) zusammen.

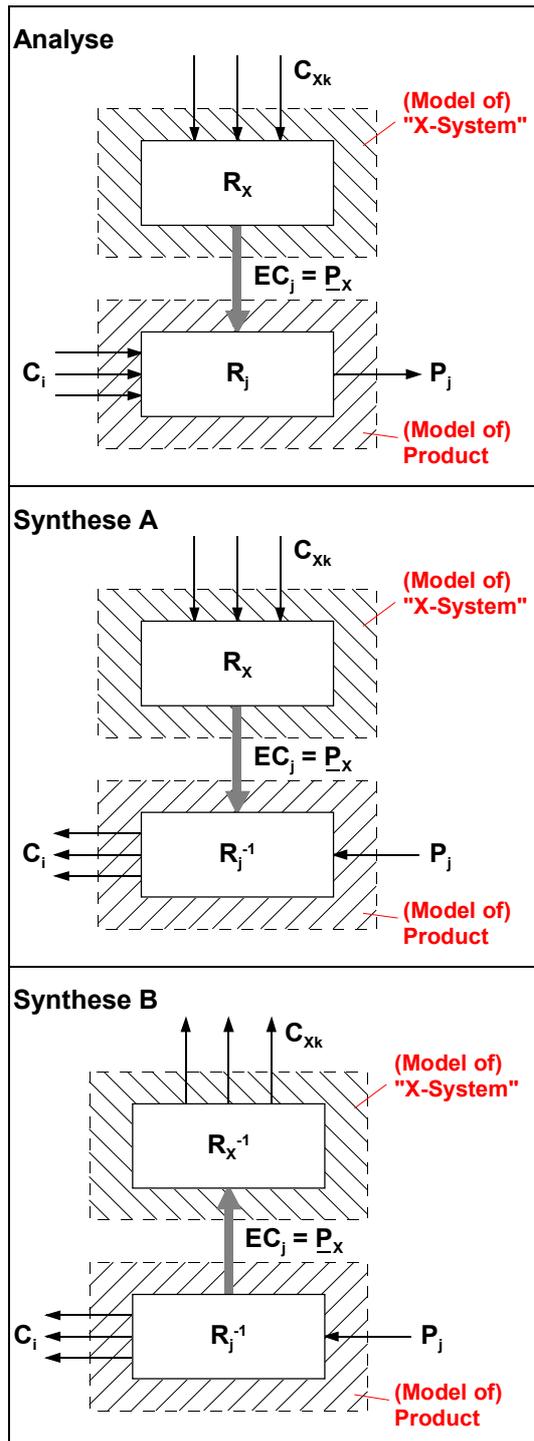


Bild 6: Verschiedene Möglichkeiten der Einbindung der äußeren Bedingungen (external conditions, EC_j)

Damit ergibt sich für das „X-System“ formal eine identische Struktur wie für das Produkt selbst. Wenn man nun auch die möglichen Bezüge zwischen den Merkmalen und den Eigenschaften – Analyse oder Synthese – für das „X-System“ in der gleichen Weise annimmt wie für das Produkt (siehe Bilder 1 bis 3), lassen sich die drei rein auf das Produkt bezogenen Fälle nach Bild 5 direkt in die drei auf Produkt und „X-System“ bezogenen Fälle nach **Bild 6** überführen.

Dieses erweiterte Basismodell führt zu sehr ähnlichen Ergebnissen wie das Konzept der „relational properties“, das Andreassen und Mortensen auf dem Symposium DfX vor vier Jahren vorgestellt haben [AnMo-97], allerdings in stärker formalisierter Form – daher vielleicht leichter in (Software-) Werkzeugen umsetzbar – und auf relativ systematischem Wege aus dem eingangs dargestellten neuen Ansatz zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen hergeleitet.

4 Werkzeuge des „Design for X“

Nach den im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Überlegungen ist „Design for X“ (DfX) das Entwickeln/Konstruieren eines Produktes im Hinblick auf Eigenschaften, die das Produkt *im Zusammenspiel mit einem anderen System X* hat (siehe auch [AnMo-97]). Es ergibt sich daraus eine Reihe von Schlußfolgerungen und Fragen zu Werkzeugen, die DfX unterstützen können. Diese werden im vorliegenden Abschnitt behandelt.

4.1 Grundaufgabe, Modellierungsumfang² und Modellierungsziele

Nach den vorstehend beschriebenen Überlegungen ist Aufgabe eines DfX-Werkzeuges, den Zusammenhang zwischen den Merkmalen eines Produktes und einer Eigenschaft (selten mehreren Eigenschaften) des Produktes zu modellieren, wobei das Partnersystem („X-System“), welches die betreffende Eigenschaft beeinflusst, in geeigneter Weise in die Modellierung einbezogen werden muß.

In bezug auf die Modellierung des Partnersystems findet man ein sehr breites Spektrum, das von der detaillierten und hochformalisierten Darstellung – etwa bei der Spritzgußsimulation

² Begriffe wie „Modellieren“ oder „Modellierung“ sind hier allgemein zu verstehen. Es sind ausdrücklich nicht nur rechnerbasierte Modelle gemeint, sondern auch alle „konventionellen“ Modell- und Modellierungsformen wie Formeln, Kataloge, (Ein-) Schätzungen etc.

mit detaillierter Berücksichtigung von Maschine, Werkzeug und Prozeßführung – bis zu elementaren Faustregeln reicht, die Informationen über das „System X“ nur noch implizit enthalten. In jedem Falle wäre es sinnvoll, zu jedem DfX-Werkzeug so genau wie möglich anzugeben, welche Eigenschaften und Merkmale des *Partnersystems* zugrunde gelegt sind.

Ein weiteres wichtiges Kriterium nicht nur für die Charakterisierung von DfX-Werkzeugen, sondern auch für deren Einsetzbarkeit im Entwicklungsprozeß ist die Frage, welche und wie viele Merkmale des *Produktes* benötigt (Analyse) bzw. festgelegt (Synthese) werden. Methoden und Werkzeuge, die in den frühen Phasen des Konstruktionsprozesses verwendet werden sollen („frühe Phasen“: im hier zugrundeliegenden Ansatz definiert durch die noch geringe Anzahl der schon bekannten Merkmale und Eigenschaften des Produktes!), können nur wenige Merkmale berücksichtigen und nur wenig strukturierte Eigenschaften erfassen. wobei „wenig strukturierte Eigenschaften“ häufig zum Urteil „nur grobe Aussagen“ vereinfacht wird. Die umgekehrte Formulierung der vorstehenden Erkenntnis ist, daß hochkomplexe – d.h. viele Merkmale und stark strukturierte Eigenschaften erfassende – DfX-Werkzeuge nur in späten Phasen zu gebrauchen sind.

Der hier geäußerte Gedanke hat folgende Konsequenz in bezug auf den mit DfX-Werkzeugen durchgeführten Entwicklungsprozeß insgesamt:

Es kann im allgemeinen Fall nicht *das* DfX-Werkzeug geben, sondern im Prozeß wird mit wachsender Anzahl der bekannten Produktmerkmale und -eigenschaften die gleiche Produkteigenschaft in „frühen“ und in „späten“ Phasen mit unterschiedlichen Werkzeugen wiederholt zu untersuchen sein.

Insgesamt erscheint es daher wenig sinnvoll, die einen Werkzeuge als „schlechter“ oder „besser“ als andere anzusehen. Aus den hier dargestellten Überlegungen ergibt sich vielmehr, daß es viel wichtiger ist, jedem Werkzeug anhand des von ihm erfaßten Merkmals- und Eigenschaftsspektrums seinen sinnvollen Platz in den „frühen“ oder den „späten“ Entwicklungsphasen zuzuweisen. Das wiederum setzt voraus, daß für jedes DfX-Werkzeug das jeweilige Spektrum an erfaßten Produktmerkmalen und -eigenschaften etwas genauer angegeben wird, als das in vielen Fällen heute üblich ist.

In bezug auf die Modellierungsziele von DfX-Werkzeugen kann im ersten Ansatz auf die im vorangegangenen Abschnitt erläuterten drei Grundfälle „Analyse“ und „Synthese A/B“ zurückgegriffen werden (siehe Bilder 5 und 6). Diese werden in den drei nachfolgenden Unterabschnitten separat behandelt.

4.2 Analyse

Wie oben bereits angesprochen, werden bei der Analyse die aus der Kombination des Produktes mit dem „System X“ resultierenden Produkteigenschaften ermittelt. In diese Klasse gehören bei weitem die meisten DfX-Werkzeuge.

Seit langer Zeit bekannt sind „konventionelle“ (d.h. an das Medium „Papier“ gebundene) Konstruktionskataloge und -regelwerke für das „X-gerechte“ Entwerfen, die in Lehre und Praxis auch heute noch das am häufigsten genutzte DfX-Werkzeug sein dürften (z.B. [Gair-81, Bode 88, Wimm-91]). Bei diesen gibt es aufgrund des Mediums „Papier“, das keine Anpassung an konkrete Fälle erlaubt, die Besonderheit, daß gar nicht die tatsächlichen Merkmale des aktuell betrachteten Produktes analysiert werden, sondern daß im Rahmen von vorausgewählten prototypischen Fällen stellvertretend dafür vordefinierte „Merkmals-/Eigenschaftsmuster“ betrachtet werden. Im Hinblick auf die Synthese, die das eigentliche Ziel des gesamten Produktentwicklungsprozesses ist, muß durch den Benutzer von papiergebundenen Katalogen/Regelwerken daher gewissermaßen eine zweifache Transferleistung

erbracht werden, nämlich erstens das „Patternmatching“ der vorbereiteten Fälle mit der konkreten Entwicklungsaufgabe und zweitens – wie bei reinen *Analysewerkzeugen* immer – das Umsetzen der Analyseergebnisse (Eigenschaften) in konstruktive Maßnahmen (Ändern/Ergänzen von Merkmalen).

Auch die meisten rechnergestützten DfX-Werkzeuge (z.B. [MeFi-89, MeFR-90]) beschränken sich auf die Durchführung von Analysen. Dies ist in der Regel bewußt so gewollt, weil – auch nach Meinung der Autoren: berechnete – Zweifel bestehen, ob bzw. inwieweit der Rechner bei der Umsetzung von Analyseergebnissen in Syntheseschritte jemals dem Menschen überlegen sein kann (siehe auch die diesbezüglichen Anmerkungen im nächsten Unterabschnitt).

Rechnergestützte DfX-Werkzeuge zur Analyse haben gegenüber papiergebundenen Katalogen und Regelwerken in jedem Fall den großen Vorteil, daß sie – beispielsweise anhand eines CAD-Modells – auf den im konkreten Fall vorhandenen Merkmalen aufsetzen können, so daß der bei papiergebundenen Lösungen erforderliche erste Schritt der Umsetzung in Synthesemaßnahmen – das „Patternmatching“ der aktuellen Situation mit den vorbereiteten prototypischen Fällen – ganz oder teilweise automatisiert werden kann.

Eine grundsätzliche Schwierigkeit bei der Analyse besteht darin, daß sich die relevanten Eigenschaften nicht immer sauber quantifizieren lassen.

Wo dies möglich ist, können Simulationen zum Einsatz kommen, die auf detaillierten Modellen des Produktes und des Partnersystems aufsetzen. Ein Beispiel hierfür ist das Programm HKB [Ferr-85], welches auf der Basis der Bauteilgeometrie und recht detaillierter Daten zur Beschreibung des Fertigungssystems einen genauen Arbeitsplan erstellt und darauf aufbauend konkrete Aussagen über die Fertigungskosten machen kann. Ein weiteres Beispiel ist eine Simulation des Werkstoffflusses in einer Spritzgußform, wie sie heute zunehmend angewandt wird.

Wenn Eigenschaften optimiert werden sollen, die nicht quantifizierbar sind (z.B.: „Wohlbefinden des Benutzers“ als geforderte Eigenschaft und Ausgangspunkt für ergonomisches Gestalten), muß man sich in Analyserichtung mit Regeln behelfen, die Aussagen der Form „unmöglich – akzeptabel – günstig“ machen. Eine Analyse auf Basis solcher Regeln läßt sich allenfalls checklistenartig durchführen, wobei man eine Quantifizierung über eine (gewichtete) Aufsummierung verletzter Regeln erreichen kann.

Eine interessante Möglichkeit, aussagekräftige Analysen ohne ein genaues Verhaltensmodell von Produkt und Partnersystem „X“ durchzuführen, bietet die heute verfügbare massive Rechenleistung: Durch Ermitteln der Korrelation zwischen Merkmalen und bestimmten interessierenden Eigenschaften für eine große Anzahl existierender Konstruktionen lassen sich Vorhersagen für ähnliche „Neu“-Konstruktionen treffen. Als Beispiel hierfür sei [Krau-98/99], angeführt, wo ein neuronales Netz darauf trainiert wurde, Vorhersagen über die Geräusch- und Schwingungsemissionen von Getrieben zu machen.

Als ähnliche, nach Kenntnis der Autoren für DfX-Anwendungen aber noch nicht realisierte Technik sei hier das sogenannte „Data-Mining“ genannt, das zwar nicht zu konkreten Vorhersagen verhilft, aber Zusammenhänge zwischen Merkmalen und Eigenschaften auf Basis vorhandener Datenbestände aufzeigen kann, wenn diese ausreichend formalisiert sind.

An dieser Stelle wird ein weiteres Problem rechnergestützter DfX-Werkzeuge offenbar: In den CAD-Systemen, die heute in den entsprechenden Phasen der Produktentwicklung das zentrale Werkzeug bilden, sind für viele (die meisten?) DfX-Analysen die relevanten Produktmerkmale überhaupt nicht explizit abgelegt: So hängt es nicht nur vom konkret verwen-

deten CAD-System, sondern sogar noch von der Modellierungsstrategie des Benutzers ab, ob das für eine Gießbarkeitsanalyse relevante Merkmal „Wanddicke“ im CAD-Modell explizit vorhanden ist oder sich nur indirekt aus Abstandsberechnungen zwischen irgendwelchen Flächen daraus ableiten läßt.

Wenn benötigte Merkmale nicht direkt zugreifbar sind, kann man versuchen, sie mittels „Patternmatching“ (hier identisch mit „Feature-Recognition“) nachträglich aus der CAD-Geometrie extrahieren. Ein anderes Konzept besteht darin, von Anfang an mit einem geeigneten Feature-basierten System zu modellieren, welches in Form der Features relevante Merkmale (gegebenenfalls zusätzlich damit verknüpfte Eigenschaften) unabhängig von der CAD-Geometriebeschreibung erfaßt.

Der zweite Lösungsansatz – grundsätzliche Modellierung mit einem Feature-basierten System – wirft nun aber wieder neue Probleme auf, wenn es nämlich darum geht, gleichzeitig mehrere Produkteigenschaften zu analysieren und zu optimieren („multiple DfX“, siehe z.B. [AnM0-97]): Denn genau hierfür würden simultan *unterschiedliche* Merkmalsmuster (= unterschiedliche Feature-Strukturen) benötigt, was vorhandene kommerzielle Feature-basierte Modellierer überhaupt nicht und selbst fortgeschrittene Forschungssysteme bisher nur ansatzweise leisten können.

4.3 Synthese A

Um für ein fest vorgegebenes „System X“ die erforderlichen Produktmerkmale zu bestimmen, kann man auf Kataloge von Syntheseregeln zurückgreifen. Diese in vielen Fällen nur relativ schwach formalisiert (typische Regel beispielsweise: „Bedienelemente möglichst innerhalb des bevorzugten Greifraumes anordnen“) und lassen sich dann nur schwierig in Softwarewerkzeuge umsetzen. Oft sind auch die Eigenschaften des „Systems X“, die solchen Regeln zugrundeliegen, überhaupt nicht explizit genannt, so daß es mitunter schon schwierig ist, ihre Anwendbarkeit im konkreten Fall zu beurteilen.

Bezüglich der Umsetzung in DfX-Software sind – von der rechnergestützten (z.B. Hyperlink-Techniken ausnutzenden) Aufbereitung „klassischer“ Regelwerke einmal abgesehen – für das Modellierungsziel „Synthese A“ folgende Ansätze bekannt und umgesetzt:

- Nicht nur die Produkteigenschaften und die Eigenschaften des „X-Systems“ (letztere sogar unter Umständen nur implizit) sind vorgegeben, sondern es ist auch das Spektrum der beeinflussbaren Produktmerkmale qualitativ fixiert, so daß die Merkmale „nur noch“ quantitativ variiert werden können. In diese Gruppe von DfX-Systemen gehören im Prinzip die schon seit längerem bekannten Parameteroptimierungsverfahren (Übersicht siehe in [Prüf-82]) einschließlich ihrer erst in jüngster Zeit umsetzbaren Ausprägungen in Form genetischer Algorithmen [Holl-73, Gold-89, Koza-92, VCJM-00].
- Die DfX-Software wird in die Lage versetzt, bei konstanten Grobgestaltungsmerkmalen wenigstens Feingestaltungsmerkmale selbsttätig anzubringen [MeFi-89, MeFR-90]. Basis hierfür ist häufig (ebenfalls) ein Feature-Ansatz mit entsprechender Hierarchisierung der Features.

Für beide Ansätze sind Lösungen bisher nur für sehr spezielle Fälle (d.h. hier: nur für eng eingegrenzte Spektren an Eigenschaften und damit korrelierten Merkmalen) vorhanden. Es bleibt unklar, inwieweit und auf der Grundlage welcher theoretischen Ansätze und Software-Architekturen und -Werkzeuge weitergehende Funktionalitäten, etwa das selbständige Festlegen von überhaupt nicht vorausgedachten Merkmalen des Produktes durch eine DfX-Software vorstellbar sind.

Darüber hinaus erscheint es derzeit nahezu unmöglich, sämtliche Regeln für alle möglicherweise interessierenden „X“ (*multiple DfX*) gleichzeitig im Syntheseprozess anzuwenden, zumal diese einander auch häufig widersprechen.

Letztendlich kann nur ein erfahrener Konstrukteur, der die meisten dieser Regeln verinnerlicht hat, sie sinnvoll in eine Konstruktion einfließen lassen, ein Prozeß, der häufig unbewußt abläuft und sich daher auch einer formalen Beschreibung oder systematischen Optimierung weitgehend entzieht.

4.4 Synthese B

In einigen Fällen und in bezug auf einige „X-Systeme“ (z.B. zur Fertigung, Montage, Recycling oder Transport) kann der besondere Fall auftreten, daß diese – zumindest teilweise – gleichzeitig mit dem Produkt entwickelt werden können oder müssen (siehe Bild 6). Ein solcher Fall läge beispielsweise vor, wenn bestimmte geforderte/gewünschte *Produkteigenschaften* sich nur mit außergewöhnlichen *Produktmerkmalen* realisieren lassen, die ihrerseits neuartige funktionale *Eigenschaften des Fertigungssystems* erzwingen. Es stellt sich dann – gewissermaßen simultan mit der Synthese des Produktes (= Festlegung der Produktmerkmale) die Frage, mit welchen *Merkmale das Fertigungssystem* ausgestattet sein muß, damit es die geforderten Eigenschaften besitzt (= Synthese des Fertigungssystems).

Beim Simultaneous Engineering in diesem Sinne ist es extrem wichtig, die Konstruktionsfreiheitsgrade (= Menge der beeinflussbaren Merkmale) sowohl des Produkts als auch des „X-Systems“ zu kennen.

Nach Wissensstand der Autoren existieren bislang noch keine konkreten Werkzeuge, die DfX in der hier betrachteten komplexesten Form unterstützen, obwohl einzelne Untersuchungen in dieser Hinsicht bereits durchgeführt worden sind (zum Teil erstaunlich früh, z.B. [Bart-87]).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wird ausgehend von einem in [WeWe-00] vorgestellten neuartigen Ansatz zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen ein Rahmenwerk zum Verständnis und zur Formalisierung von DfX und DfX-Werkzeugen präsentiert. Es werden Möglichkeiten zur Klassifizierung und Neuausrichtung von DfX-Werkzeugen aufgezeigt.

In einem nächsten Schritt sollen bekannte DfX-Lösungen nach diesen Kriterien näher untersucht und gegebenenfalls weiterentwickelt werden mit dem Ziel, ihre systematische Einführung und Nutzung in der Praxis zu unterstützen. Sehr interessant erscheinen auch die aus den Überlegungen erwachsenden theoretisch-konzeptionellen Fragen, etwa zu den Grenzen der Übertragung von Synthesetätigkeiten an den Rechner. Schließlich sind die Untersuchungen ein wichtiger Prüfstein zur kritischen Evaluation und Weiterentwicklung des zugrunde liegenden neuen Modellierungsansatzes insgesamt.

6 Literaturverzeichnis

- [AnMo-97] Andreasen, M.M.; Mortensen, N.H.: Basic thinking patterns and working methods for multiple DFX. In: [DfX-97], S. 7-12.
- [Bart-87] Barthelmeß, P.: Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung": Dissertation TU München 1987. iwv Forschungsberichte, Band 9, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 1987.

- [Bode-88] Bode, K.-H.: Konstruktions-Atlas. Hoppenstedt-Verlag, Darmstadt 1988.
- [DfX-97] Meerkamm, H. (Hrsg.): Report 7. Symposium „Fertigungsgerechtes Konstruieren“, Schnaittach/Erlangen 1996. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg 1997.
- [DfX-00] Meerkamm, H. (Hrsg.): Report 11. Symposium "Design for X", Schnaittach/Erlangen 12.-13.10.2000. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg 2000.
- [Ferr-85] Ferreirinha, P.: Herstellkostenberechnung von Maschinenteilen in der Entwurfsphase mit dem HKB-Programm. In: [ICED-85], S. 461-467.
- [Gair-81] Gairola, A.: Montagegerechte Konstruktion. Dissertation TH Darmstadt, 1981.
- [Gold-89] Goldberg, D.E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley-Verlag, Reading 1989.
- [Holl-73] Holland, J.: Genetic Algorithms and the Optimal Allocations of Trials. SIAM Journal of Computing 2 (1973) 2, S. 88-105.
- [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-85] Hubka, V. (Herausgeber): Proceedings of the International Conference on Engineering Design, Hamburg 1985 (ICED 85), WDK 12. Heurista-Verlag, Zürich 1985.
- [Koza-92] Koza, J.R.: Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. MIT-Press, Cambridge 1992.
- [Krau-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.
- [MeFi-89] Meerkamm, H.; Finkenwirth, K.-W.: „Konstruktionssystem Fertigungsgerecht“ – ein Expertensystem für den Konstrukteur? In: [VDI-775], S. 99-114.
- [MeFR-90] Meerkamm, H.; Finkenwirth, K.-W.; Räse, U.: Fertigungsgerecht Konstruieren mit CAD-Systemen. Konstruktion 42 (1990) 10, S. 293-298.
- [Prüf-82] Prüfer, H.-P.: Parameteroptimierung – ein Werkzeug des rechnerunterstützten Konstruierens. Dissertation Ruhr-Universität Bochum 1982. Schriftenreihe des Instituts für Konstruktionstechnik, Bochum 1982.
- [Suh-90] Suh, N.P.: The Principles of Design. Oxford University Press 1990.
- [VCJM-00] Vajna, S.; Clement, S.; Jordan, A.; Mack, P.; Bercsey, T.: Autogenetische Bauteilkonstruktion. In: [VDI-1569], S. 369-383.
- [VDI-775] VDI-Berichte Nr. 775: Expertensysteme in Entwicklung und Konstruktion. VDI-Verlag, Düsseldorf 1989.
- [VDI-1569] VDI-Berichte Nr. 1569: Produkte entwickeln im realen Umfeld. VDI-Verlag, Düsseldorf 2000.
- [WeWe-00] Weber, C.; Werner, H.: Klassifizierung von CAx-Werkzeugen für die Produktentwicklung auf der Basis eines neuartigen Produkt- und Prozeßmodells. In: [DfX-00], S. 126-143.
- [Wimm-91] Wimmer, D.: Kunststoffgerecht Konstruieren. Hoppenstedt-Verlag, Darmstadt 1991.

Prof. Dr.-Ing. Christian Weber, Dr.-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